

# 硕士学位论文

带悬绳负载的无人机视觉跟踪控制研究

STUDY ON VISUAL TRACKING CONTROL OF  
UAV WITH A SUSPENDED CABLE LOAD

崔健



哈尔滨工业大学

2017 年 12 月

国内图书分类号：TP242

国际图书分类号：621

学校代码：10213

密级：公开

## 工程硕士学位论文

# 带悬绳负载的无人机视觉跟踪控制研究

硕 士 研 究 生：崔健

导 师：陈浩耀 副教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：控制科学与工程

所 在 单 位：深圳研究生院

答 辩 日 期：2017 年 12 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP242

U.D.C: 621

Dissertation for the Master Degree In Engineering

**STUDY ON VISUAL TRACKING CONTROL OF  
UAV WITH A SUSPENDED CABLE LOAD**

<b>Candidate:</b>	Cui Jian
<b>Supervisor:</b>	Assoc. Prof. Chen Haoyao
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master Degree In Engineering
<b>Speciality:</b>	Control Science and Engineering
<b>Affiliation:</b>	Shenzhen Graduate School
<b>Date of Defence:</b>	December, 2017
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	Harbin Institute of Technology

## 摘 要

随着科学技术的飞速发展，无人机飞行技术有了巨大的提升。无人机以其优良的性能，近年来在各种领域获得了广泛的应用。尤其是在民用领域，无人机承担了许多特殊环境下的作业工作，国家社会也投入了巨大的财力于无人机的相关研究。其中，无人机运输是无人机应用领域的重要分支。本文针对无人机运输任务展开研究。针对无人机-悬挂负载运输的问题，首先需要无人机可以控制无人机自身不受悬挂负载的摆动的影响并且可以主动调整无人机自身的姿态使得悬挂负载的摆动快速减小，然后需要使得无人机-悬挂物系统在稳定飞行的情况下对运输的目的地进行长期有效的跟踪。

针对以上设计要求，本文使用轻质悬绳连接负载，并在四旋翼无人机模型的基础上，使用欧拉-拉格朗日方程建立了无人机-悬挂物的联合动力学模型。并应用该模型设计了无人机-悬挂物姿态控制器。使用竖直向下的摄像头实时观测悬挂物，并使用融合卡尔曼滤波的 CamShift 跟踪算法对悬挂物进行实时跟踪。建立了相机-悬挂物几何模型，将 CamShift 算法跟踪得到的二维图像坐标转化为悬挂物相对于无人机的三维物理坐标。由于在运输过程中，无人机跟踪目标并非静止，因此针对这个问题，本文设计了基于 TLD 的视觉跟踪控制器，利用 TLD 算法得到的目标信息作为参考输入，进而控制无人机飞行。由于悬挂负载会对无人机的控制产生严重干扰，因此本文在视觉伺服控制器的基础上，结合无人机-悬挂负载动力学模型，设计了无人机-悬挂物飞行控制器，其中包括无人机和悬挂负载的位置控制环、悬挂负载的姿态控制环及无人机的姿态控制环三部分。

为了验证本课题提出的算法，本文在基于 Gazebo 仿真的基础上对整个系统进行了真实场景下的实验，搭建了硬件平台，首先在运动捕捉系统下进行了无人机-悬挂物控制器以及视觉追踪控制器的实验，分别验证了无人机-悬挂物的飞行控制以及无人机-悬挂物系统视觉追踪控制器的飞行控制。本文对无人机利用悬绳运输的探索与研究，对这一方向的其他人的研究有重要参考作用。

**关键词：**无人机-悬挂物控制器；相机-悬挂物模型；视觉追踪控制器；无人机运输

## Abstract

With the rapid development of science and technology, UAV flight technology has been greatly improved. Unmanned aerial vehicle (UAV) has been widely used in various fields in recent years because of its excellent performance. Especially in the field of civil aviation, UAVs have undertaken many operations under special circumstances. The state society has invested huge amounts of money in the research of UAVs. Among them, UAV transportation is an important branch of UAV application field. This paper studies the transport task of unmanned aerial vehicle. According to the UAV suspension load tracking control problem, the design of UAV - suspension attitude controller, the UAV - suspension system can stable flight, proposed visual servoing method based on the tracking of the target drone - stable suspension load system.

In view of the above design requirements, we use the light suspended rope load, and based on the four rotor UAV model, use the Euler Lagrange equation to establish the joint dynamics model of UAV suspension. The UAV suspension attitude controller is designed by using the model. The suspension objects are observed in real time using a vertical downward camera, and the CamShift tracking algorithm fusion Kalman filter is used to track the suspended objects in real time. The geometric model of the camera suspension is established, and the two-dimensional image coordinates obtained by the CamShift algorithm are transformed into the three-dimensional physical coordinates of the suspension relative to the UAV. During the transportation process, the UAV tracking target is not static. Therefore, in view of this problem, a visual tracking controller based on TLD is designed in this paper. The target information obtained by TLD algorithm is used as reference input to control UAV flight. Due to the suspension load will cause serious interference to the control of the UAV, based on visual servo controller, combining UAV suspension load dynamics model, visual servo output tracking controller is designed based on reference, including UAV and suspension load position control loop, suspension load and posture control loop the three part human posture control loop.

In order to verify the algorithm proposed in this thesis, based on the Gazebo simulation on the whole system of the real scene experiment, set up the hardware platform, the first UAV - suspension controller and visual tracking controller experiment in a motion capture system, verifies the flight control suspension - UAV the flight control and visual tracking controller. Then two system combined controller verification tests are carried out. In this paper, the exploration and

research of unmanned aerial vehicle's use of suspended rope transportation has a reference for other people's research in this direction.

**Keywords:** UAV with suspension controller, Camera suspended model, visual tracking controller, Unmanned aerial vehicle transportation

# 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 课题研究背景及意义 .....	1
1.2 无人机运输研究现状 .....	3
1.2.1 国内研究现状 .....	3
1.2.2 国外研究现状 .....	4
1.3 无人机视觉跟踪控制国内外研究现状 .....	6
1.3.1 国内研究现状 .....	6
1.3.2 国外研究现状 .....	7
1.4 国内外研究现状总结 .....	7
1.5 本文主要研究内容 .....	7
第 2 章 多旋翼无人机-悬挂负载系统建模 .....	9
2.1 动力学建模 .....	9
2.1.1 四旋翼动力学模型 .....	9
2.1.2 无人机-悬挂物系统动力学建模 .....	11
2.2 视觉跟踪系统模型 .....	14
2.2.1 无人机-相机模型 .....	14
2.2.2 相机-悬挂物模型 .....	16
2.3 本章小结 .....	18
第 3 章 无人机-悬挂物飞行控制器设计 .....	19
3.1 基于改进 CamShift 算法的悬挂物位置估计 .....	19
3.2 无人机-悬挂物飞行控制器设计 .....	22
3.2.1 无人机-悬挂物位置控制环设计 .....	22
3.2.2 无人机-悬挂物姿态控制环设计 .....	23
3.2.3 无人机姿态控制环设计 .....	24
3.3 本章小结 .....	25
第 4 章 无人机-悬挂物视觉跟踪系统控制器设计 .....	27
4.1 基于 TLD 的目标视觉跟踪 .....	27
4.2 基于 TLD 算法的无人机-悬挂物视觉跟踪控制器 .....	28
4.3 本章小结 .....	32
第 5 章 实验平台搭建及实验结果分析 .....	33
5.1 实验平台的搭建 .....	33

5.1.1 ROS 操作系统.....	33
5.1.2 硬件平台的搭建 .....	33
5.2 实验结果及分析 .....	34
5.2.1 鱼眼相机的标定 .....	34
5.2.2 相机-悬挂物模型实验 .....	36
5.2.3 无人机-悬挂物飞行控制器实验结果及分析 .....	39
5.2.4 无人机-悬挂物系统视觉跟踪实验结果及分析 .....	40
5.3 本章小结 .....	42
结 论 .....	43
参考文献 .....	45
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限 .....	50
致 谢 .....	51



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 课题研究背景及意义

无人机即无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), 其技术与应用领域<sup>[1]</sup>正在迅猛的发展着。在 21 世纪初, 无人机常常被指军事上使用的大型无人机, 主要是用来军事侦察使用。而真正意义上的微型无人机是近 10 年内迅速发展起来的。常见的无人机一般为固定翼和旋翼两大类。近年来, 随着新材料、微机电、计算机技术等的发展, 微型旋翼无人机得到越来越多的关注。相比于固定翼, 微型旋翼无人机有着自身独特的优点。微型旋翼无人机操控原理简单, 只需要简单地控制遥控器就可实现无人机的垂直起飞、降落、悬停、偏航、横滚、俯仰等运动。同时微型旋翼无人机质量轻、个体小、结构简单、灵活性好、零部件损坏也比较容易更换, 而固定翼的零件往往是多而大, 相对复杂<sup>[2]</sup>。

基于无人机自身的优点, 微型旋翼无人机深受广大研究者的喜爱, 微型旋翼无人机的应用也逐渐增多。在微型旋翼无人机中, 多旋翼无人机的用途最广。除了常见的航拍、农业植保、电力巡检<sup>[3]</sup>、监测外, 多旋翼无人机还在未知环境感知、货物搬运、三维重构、建筑等方面拥有巨大的应用前景, 如图 1-1 所示为无人机在运输、农业植保、救援、航拍方面的应用。



图 1-1 无人机在航拍、农业、救援、运输领域的应用

但是无人机发展到今天, 也逐渐遇到了瓶颈。从商业应用的角度来看无人

机目前的主要应用场景还主要是民用航拍，虽然京东、顺丰等国内一线公司也在进行无人机物流运输的开发，但是由于技术上的瓶颈和应用场景的限制，目前国内外还没有特别好的无人机应用案例。从研究领域来看，目前国内外一流实验室对于单纯旋翼无人机的运动控制研究已经基本十分成熟，对于旋翼无人机的研究主要集中在在无人机上搭载机械臂或其他机构实现联合控制，或对特殊结构的旋翼无人机进行动力学控制研究<sup>[4-6]</sup>。

随着无人机的发展，无人机的下一个应用爆发是很可能是物流领域。运用无人机进行运输，有很多种实现方法，目前国内主要的实现方式是将货物直接放在无人机底部进行运输如图 1-2 所示：



图 1-2 京东无人机负载搬运

在本文中，我们解决的问题是使用四旋翼连接悬挂式负载进行货物运输。本文主要针对多旋翼无人机-悬挂负载的搬运控制技术进行研究。带悬挂式负载的无人机的运动是复杂的，因为负载的摆动很难控制。然而，摆动控制对于无人机飞行和成功运输是必不可少的。这种应用常见于军事领域，飞行员控制载人直升机将货物从一个地方搬运到另外一个地方，如图 1-3 所示。由于无人机系统本身是一种高度非线性且不稳定的动力学系统，增加的悬挂负载会加重无人机系统的不稳定性，这给控制器的设计带来很大困难。同时，悬挂负载也会给无人机的控制操作带来一些危险，尤其是在一些杂乱或是人类难以到达的环境，如人口密集的城市、灾难现场等。悬挂负载对无人机的干扰很可能导致无人机飞行不稳定，甚至可能导致灾难的发生，所以必须对悬挂负载的干扰加以控制。目前国外已经有很多文献对无人机-悬挂物系统的动力学模型<sup>[7]</sup>进行了研究，尝试使用自动控制技术来降低悬挂负载对无人机的影响。本文正是在基于这样的现实背景和意义下提出来的。

下面将对国内外学者在无人机搬运<sup>[8]</sup>和无人机视觉伺服控制技术<sup>[9-10]</sup>两个方面的研究现状进行分析。



图 1-3 直升机悬挂负载搬运

## 1.2 无人机运输研究现状

### 1.2.1 国内研究现状

国内对于无人机-悬挂物系统运输的研究还非常少，对于无人机运输的研究也只是直接将负载捆绑在无人机底部，更偏重于工程上的实现，主要是京东、顺丰等物流公司在进行研究。

浙江大学的李伟荣研制了一种带悬挂吊舱的八旋翼特种无人机，并且针对他们的无人机进行了动力学建模研究<sup>[11]</sup>，设计了 PID 控制器，考虑并且讨论了吊舱质量对无人机飞行的影响、飞行速度对吊挂的影响、吊舱气动力对吊挂飞行的影响、绳索长度对吊挂飞行的影响。并且完成了无人机吊挂在高空 200 米的飞行实验并且实现安全降落。但是其只考虑了风速、吊舱质量、绳长等固定条件对飞行的影响并作出调整，并没有实时的检测悬挂吊舱的位置去调整无人机的姿态，对于悬挂物而言，相当于开环控制，并不能很好的实现对悬挂物的机动性控制。

北航的 S.Dai<sup>[12]</sup>与乔治华盛顿大学的 T.Lee 设计了一种基于回顾成本的自适应控制方法，从而解决了悬挂物的未知信息引起的控制发散问题。

S Yang<sup>[13]</sup>等人提出了一种基于系统部分反馈线性化的控制策略。首次提出了一种新的基于系统输入输出稳定得悬挂物跟踪控制律。并通过李雅普诺夫稳定性分析证明了系统是半全局稳定的。

哈尔滨工业大学的贾二平设计了一种无人机-悬挂物运输系统<sup>[14]</sup>，并通过 Gazebo 仿真验证了算法的有效性。

哈尔滨工业大学的李婷使用强化学习的方法规划了无人机-悬挂物系统的飞行轨迹<sup>[15]</sup>，并通过 Gazebo 仿真验证了算法的可行性。

### 1.2.2 国外研究现状

目前，国外一些优秀的团队针对无人机-悬挂物系统进行了大量的研究。目前已经取得了不错的研究成果。针对悬挂物系统目前已经有一些控制方法发表，但是，早期的研究主要是稳定负载以保持最小的摆动<sup>[16-17]</sup>。

Noritaka Yanai<sup>[16]</sup>针对起重机系统提出了一种反馈控制方法，该方法建立系统逆动力学模型并将其线性化。通过该方法可以保持悬挂物在运动过程中摆动最小。

除此之外，还有团队研究了使负载达到最小摆动的运动轨迹生成方法<sup>[19-20]</sup>。例如，Jarvis Schultz<sup>[18]</sup>等人研究了在磁悬浮倒立小车上悬挂负载进行快速运输的控制策略。他们提出了一种具有强鲁棒性并且可以自行解决问题的轨迹生成策略使得他们提出的动力模型可以在应用在实际系统上。

使用直升机和四旋翼平台挂载悬挂物的系统也已经提出。例如，H. Omar 等人<sup>[21]</sup>利用模糊控制理论的设计了一种反摆动控制器，将直升机负载系统的非线性动力学方程在悬停处线性化，由此产生的线性模型用于设计跟踪直升机的位置的线性二次型（LQR）控制器。这个反摆动控制器还作用于该直升机的位置跟踪控制器。该方法使用集群技术构造模糊规则，模糊控制的输入是负载摆动角度和摆动速率，模糊控制的输出是负载摆动造成的直升机重心偏差的导数。但是该控制器只适用于直升机负载系统。

I. Palunko 等人<sup>[22]</sup>提出了一种将非线性的悬挂负载模型在轨迹点附近线性化的方法，得到一个线性时变模型（LTV），然后用动态规划的方法生成四旋翼无人机和悬挂负载的运动轨迹。但是该方式由于悬挂负载的摆动会导致多旋翼无人机的重心发生变化。在该成果的基础上，I. Palunko 于 2012 年又提出了一种用动态规划生成最优的运动轨迹的方法<sup>[23]</sup>，同时设计了一个自适应控制器，解决了上述无人机重心变动的问题，并证明了该自适应控制器能够准确地跟踪多旋翼无人机的位置和姿态。但是该方法需要提前规划好搬运轨迹，不能达到实时搬运的目的。

V. Kumar 等人<sup>[24]</sup>在 2013 年提出了一种非线性控制方法。首先针对无人机-悬挂负载系统的稳定性问题，建立了多旋翼无人机-悬挂负载混合系统，该系统包含两种不同行为。一种是悬绳上张力为零时，悬挂负载做自由落体运动；另

一种是悬绳上张力不为零时，无人机受到悬挂负载的影响。同时证明了在悬挂负载的位置作为输出时，该系统为微分平滑系统。微分平滑性质决定了这个系统的所有内部变量可以由某特殊的变量及其导数（称为平滑输出）来表示。最后设计了四旋翼的姿态、悬挂负载的位置和姿态的跟踪控制器，但是该方法仅限于在 2D 空间。同年 Kumar 将该方法扩展到 3D 空间<sup>[25]</sup>。尽管使用微分平滑特性能够简化运动规划问题，保证所设计的路径的可行性。但是它仍然需要一个用于保持稳定的控制器。同时，微分平滑的平滑输出集需要人工推导，这个过程很费时，并且需要对系统的动力学等有深入的了解。

Allothman Y 等人<sup>[26]</sup>在 2015 年针对四旋翼无人机-悬挂负载系统的搬运提出了一种线性二次型调节器（LQR）的控制方法。当无人机处于悬停时，在悬停点将无人机-悬挂负载系统的非线性动力学模型线性化。并和 PD 控制器比较，证明了其收敛速度。但是该方法只能在无人机处于悬停状态下使用。

C.de Crousaz 等人提出了一种迭代线性二次高斯控制（LQG）<sup>[27]</sup>的方法，用其生成四旋翼无人机-悬挂负载系统的初始控制轨迹<sup>[28]</sup>。最初的控制轨迹通过仿真得到，之后利用强化学习算法在线学习试验。对任意非线性成本函数，iLQG 方法经过多次迭代最终返回局部最优的线性反馈控制器。在每次迭代过程中，系统是在标准轨迹附近线性化，非线性成本函数的二阶近似经过最小化得到一个新的控制输出。但是该方法需要提前规划好运动轨迹，不能够实时，而且在搬运过程中运动路线固定。

Aleksandra Faust 等人<sup>[29]</sup>通过强化学习的方法生成悬挂负载的运动轨迹。为确保悬挂负载跟踪规划的参考轨迹，无人机需要学习自身运动轨迹。这个方法基于最小二乘迭代策略，是强化学习方法的一种。采用此方法的主要优点是不需要建立系统的模型，所以该方法较适合对模型复杂、难以建模的控制系统，并且该方法对噪声的影响更具鲁棒性，但是需要对特定的负载进行训练，而且不能够实时规划运动轨迹。

Taeyoung Lee<sup>[30]</sup>等人对多架无人机连接负载进行了动力学建模，并且设计了几何 PID 控制器，该控制器可以对负载的位置和姿态同时进行控制。

Foehn P<sup>[31]</sup>等人提出了一种新的无人机-悬挂物建模方法，将其建模为一个软体链接与两个转动副和一个移动关节的组合。此模型在设计无人机-悬挂物控制器时不需要考虑绳子上的张力大小。Foehn P 还提出一种快速轨迹优化技术，将悬挂物的摆动轨迹问题转化为一个带互补约束的数学规划问题。通过实验证明，该方法在计算速度和轨迹优化方面都有更优秀的表现。

## 1.3 无人机视觉跟踪控制国内外研究现状

针对视觉跟踪算法，主要分为两大类：生成<sup>[32]</sup>（generative）模型方法和判别<sup>[33]</sup>（discriminative）模型方法，目前主要流行的是判别类方法，也就是检测跟踪（tracking-by-detection）。生成类算法就是对现有帧进行目标建模，在下帧寻找与目标模型最相似区域，也就是目标预测，比较著名算法有卡尔曼滤波<sup>[34]</sup>、粒子滤波<sup>[35]</sup>、mean-shift<sup>[36]</sup>等。判别类算法主要是使用图像特征结合机器学习的方式，以目标区域为正样本，背景区域为负样本，并以此结合机器学习训练分类器，在下一帧使用这一帧的分类器，比较经典的有 Struck<sup>[37]</sup>和 TLD<sup>[38]</sup>。还有基于相关滤波和深度学习的视觉跟踪算法也发展的十分迅速<sup>[39-41]</sup>。

### 1.3.1 国内研究现状

在无人机跟踪控制方面，国内的研究较为丰富，主要是集中与改进国外提出的几种前沿的跟踪算法，南京理工大学的袁骏<sup>[42]</sup>研究并且对比和目前主流的视觉跟踪算法，并且提出了基于特征点一致性匹配的跟踪算法（Consensus-based Tracking and Matching of Keypoints for Object Tracking）和时空上下文跟踪算法（Spatio-Temporal Context）的改进后的跟踪算法。

国防科学技术大学的范才智<sup>[43]</sup>设计了一种层级控制器，该控制器的外回路是通过图像特征估算无人直升机的期望位置，采用 PD 控制器作为无人机的高度环和姿态环，设计了两个模糊控制器作为无人机的水平位置环，控制无人机的 x 和 z 方向。该方法的优点是无须知道摄像头的内参和平移外参。

哈尔滨工业大学的姜运宇<sup>[44]</sup>建立了无人直升机和目标的运动学模型以及云台控制系统的数学模型，定义了云台的跟踪误差，并通过卡尔曼滤波理论对运动目标的运动状态估计，得到了目标在惯性坐标系下的位置和速度，设计了云台和无人机的跟踪控制器，并在 Simulink 环境下证明了该控制器的效果。

中国科学院的赵晓光<sup>[45]</sup>提出了一种基于视觉伺服的小型无人直升机地面移动目标跟踪控制系统。建立了无人直升机的速度动力学模型，根据模型和移动目标的图像信息，设计了无人直升机的视觉伺服控制系统，实现了对地面移动目标的跟踪，并在运动目标进行简单运动（如直线运动）和复杂运动（如 S 形运动）等情况下验证了该方法的有效性。

国防科学技术大学的王勋提出了一种无人机自主跟踪地面运动目标的控制方法<sup>[46]</sup>，采用目标状态估计算法，并且设计自主跟踪引导控制律实现了对目标的稳定跟踪。

南京航天航空大学的张天翼等人提出一种自适应控制无人机跟踪控制方法



[47]。采用单目和双目结合的方式，单目用于跟踪目标，采用 Kalman 预测优化的自适应算法对目标进行长期有效的跟踪。该方法在跟踪的基础上结合了双目，对无人机避障进行了研究，使得在跟踪的过程中可以及时的躲避障碍。并在仿真中验证了该方法的正确性。

### 1.3.2 国外研究现状

对于视觉跟踪在无人机方面的应用,Heiko H 等人提出了一种 OATS(Oxford Aerial Tracking System)跟踪系统<sup>[48]</sup>,可以实现无人机实时的对地面移动目标进行跟踪,并且可以在地面站指定跟踪目标,进行实时跟踪。由于跟踪部分使用的是 CamShift 算法<sup>[49]</sup>,因此跟丢的概率也比较大,当失去目标时,系统将进行目标搜索,重新定位目标。

南加州大学的 AVATAR 团队针对无人机视觉跟踪<sup>[50]</sup>、无人机定点降落<sup>[51]</sup>、无人机导航<sup>[52]</sup>都进行了研究。其主要策略是先通过 GPS 对目标进行粗略的定位,待无人机飞到目标正上方,通过视觉的方式对目标进行跟踪,并且结合光流信息对无人机降落进行控制。

宾夕法尼亚大学的 Kumar 教授提出了基于图像的视觉伺服方式完成高速空中无人机抓取的任务<sup>[53][54]</sup>。通过在无人机上安装的摄像头获得图像,在图像上识别目标物并控制摄像头跟踪目标物,建立无人机位置和目标在图像中的位置的几何关系,并将标定过的图像上的目标映射到一个虚拟水平图像上来解耦无人机的姿态和图像位置。根据上面建立的几何关系,将无人机的动力学模型带入到图像空间,建立图像空间的动力学模型,并证明路径在在图像空间的微分平滑性。

## 1.4 国内外研究现状总结

目前国外对于无人机悬挂式负载飞行控制的研究主要集中于生成轨迹方面。在进行运输任务时,控制器需要提前规划出理想轨迹。并且,整个系统往往需要借助外界传感器,如运动捕捉系统,提供悬挂负载的实时位置信息反馈。对于视觉跟踪控制的研究主要针对无人机本身的视觉伺服控制。

## 1.5 本文主要研究内容

本文基于无人机悬挂式运输这一实际背景,设计无人机-悬挂物视觉跟踪系统,并且使用机载摄像头获得悬挂物的位置实时反馈,使得无人机在控制悬挂物稳定的情况下可以实时的跟踪运输目标,旨在实现无人机自主通过悬绳悬挂货物进行运输工作。针对在整个运输过程中视觉跟踪控制器以及无人机-悬挂物

控制器的研究，本分的研究内容主要分为以下四个方面。

(1) 本文将采用欧拉-拉格朗日方程对无人机-悬挂物系统进行联合动力学建模，推导出系统动力学方程。

(2) 本文考虑使用一个竖直向下的相机观测悬挂物的实时位置，由于相机观测到悬挂物的摆动在图像中是二维坐标，而控制器需要悬挂物世界坐标系下的三维位置信息。由于绳长已知，本文将根据相机与悬挂物的位置关系建立相机-悬挂物几何模型，通过该模型将图像平面的二维信息转换为世界坐标系下的三维信息，为无人机-悬挂物控制器的设计提供基础。

(2) 本文将根据无人机-悬挂物动力学方程设计无人机-悬挂物飞行控制器，由于悬挂物的摆动使得传统的无人机控制器无法使无人机稳定飞行，本文拟引入悬挂物摆动角度的反馈量和悬挂物位置的反馈量并结合无人机自身的位置设计 **PD** 控制器，将在姿态控制环融合无人机-悬挂物动力学方程特性设计无人机-悬挂物姿态控制器。

(3) 本文将在无人机-悬挂物的基础上设计基于 **TLD** 算法的无人机-悬挂物系统视觉跟踪控制器，由于 **TLD** 算法得到的反馈量为图像平面二维目标偏移量和目标框大小，共 3 个控制量。用此偏移量来控制无人机 4 个自由度飞行，因此无人机的自由度之间是存在耦合的。本文拟设计一种解耦的方法，可以使图像平面的 3 个控制量通过解耦后得到 4 个控制量分别对应无人机飞行 4 个自由度。并由这 4 个控制量设计 **PD** 控制器，控制无人机飞行。

(4) 为了验证设计的控制器及算法的可行性。本文将搭建无人机实验平台并在 **ROS** 下对所有算法进行的验证和实物实验，进行对比实验对实验结果进行分析。



## 第 2 章 多旋翼无人机-悬挂负载系统建模

要实现负载搬运任务，需要完成两个任务：首先是对无人机以及负载的控制，然后是对无人机的视觉跟踪控制。所以本文需要确定无人机-悬挂负载系统的动力学模型和无人机-相机几何模型。由于本文通过相机实时跟踪悬挂物的位置，因此还需要建立相机-悬挂物模型。本章将针对无人机-悬挂物模型进行动力学推导，对无人机-相机和相机-悬挂物模型进行几何模型推导。

### 2.1 动力学建模

多旋翼无人机-悬挂负载控制系统由多旋翼无人机、负载和柔性绳子组成，下面将先推导无人机动力学模型，然后根据无人机和悬挂负载之间的耦合关系，推导多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，建立无人机和悬挂负载的关系，为后续跟踪控制器设计提供模型基础。

#### 2.1.1 四旋翼动力学模型

首先考虑如图 2-1 中的四旋翼模型，这是一个典型的由四个旋翼组成的 X 字形四旋翼系统，其中四个螺旋桨产生的升力和扭矩都与四旋翼机翼形成的四边形平面正交。

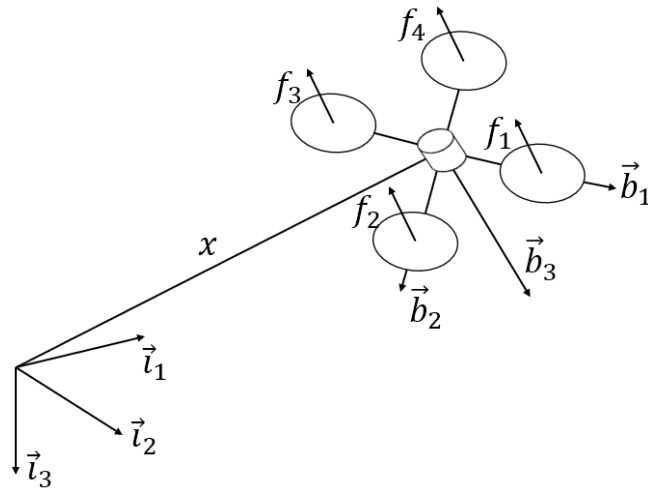


图 2-1 四旋翼模型

首先，我们选择一个参考惯性坐标系  $\{\vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3\}$  和固定机体坐标系  $\{\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3\}$ 。机体坐标系的原点位于无人机的质心处。其中机体坐标系的前两个

坐标轴位于四旋翼组成的平面上，第三个坐标轴垂直机体向下，满足右手法则。整个无人机的位置由无人机的重心位置决定，而无人机的姿态则是参考无人机相对于惯性坐标系下的姿态使用旋转矩阵  $\mathbf{R} \in SO(3)$  来表示，而整个无人机的位姿矩阵属于李群  $SE(3)$ 。

假设每支螺旋桨产生的升力都是可以直接控制的，并且升力的方向垂直于无人机平面。则所有螺旋桨产生总的升力就为  $f = \sum_{i=1}^4 f_i$ ，其方向为  $-\vec{b}_3$ 。根据旋转矩阵的定义  $\mathbf{R} \in SO(3)$ ，机体坐标系的坐标轴  $\vec{b}_i$  在惯性坐标下的表示为  $\mathbf{R}\mathbf{e}_i$ ，在这里  $\mathbf{e}_1 = [1; 0; 0]$ ， $\mathbf{e}_2 = [0; 1; 0]$ ， $\mathbf{e}_3 = [0; 0; 1] \in \mathbb{R}^3$ 。因此，四旋翼受到的升力在惯性坐标系下的表示为  $-f\mathbf{R}\mathbf{e}_3 \in \mathbb{R}^3$ 。

表 2-1 四旋翼模型的变量

参数名称	参数值
无人机质量	$m_Q \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的惯性矩阵	$\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$
机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵	$\mathbf{R} \in SO(3)$
无人机角速度	$\boldsymbol{\Omega} \in \mathbb{R}^3$
无人机位置	$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$
无人机线速度	$\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$
质心与螺旋桨间的距离	$d$
第 $i$ 支螺旋桨产生的升力	$f_i$
第 $i$ 支螺旋桨产生的扭矩	$\tau_i$
无人机在机体坐标系整体上升力	$f \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的力矩	$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$

假设每支螺旋桨产生的扭矩与其产生的升力是成正比的，因此也就是说，第一支和第三支螺旋桨顺时针旋转，第二支和第四支螺旋桨逆时针旋转，将会分别产生沿着  $-\vec{b}_3$  方向的力  $f_i$ ，和第  $i$  支螺旋桨产生的扭矩  $\tau_i = (-1)^i c_{\tau f} f_i$ ，这里  $c_{\tau f}$  为固定常数。以上的假设都源自论文<sup>[54-56]</sup>，在这些假设下，无人机所受合力  $f$  和转矩  $\mathbf{M}$  的关系为：

$$\begin{bmatrix} f \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -d & 0 & d \\ d & 0 & -d & 0 \\ -c_{\tau f} & -c_{\tau f} & -c_{\tau f} & -c_{\tau f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中的  $4 \times 4$  矩阵的行列式为  $8c_{\tau f}d^2$ ，因此当  $d \neq 0$  和  $c_{\tau f} \neq 0$  时，这个矩阵是可逆的。因此对于给定的  $f$ ， $M$ ，每支螺旋桨上产生的升力可以通过公式 (2-1) 计算得出。四旋翼无人机的运动模型可以给出：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \quad (2-2)$$

$$m\dot{\mathbf{v}} = m\mathbf{g}e_3 - f\mathbf{R}e_3 \quad (2-3)$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\Omega}} \quad (2-4)$$

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (2-5)$$

$$J\alpha + \frac{1}{2}J\omega^2 = M$$

这里关于  $\times$  运算为： $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$  对所有  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^3$ 。

### 2.1.2 无人机-悬挂物系统动力学建模

对于多旋翼无人机-悬挂物系统，可以先孤立无人机系统单独分析悬挂物的摆动。对无人机-悬挂物系统进行了简化，简化后的模型如图 2-2 所示。整个系统有 8 个自由度，由于无人机的控制只有横滚角 (roll)、俯仰角 (pitch)、偏航角 (yaw) 和油门，因此系统中有 4 个自由度是欠驱动的。当绳子处于松弛状态时，无人机与悬挂物之间相当于分离开的两个独立的系统，整个系统的动力学模型发生了变化，由于无人机-悬挂物系统在飞行时悬绳始终保持紧绷状态，因此本文只考虑悬绳紧绷状态并对整个无人机-悬挂物系统进行动力学建模，一些常用变量以及物理量在表 2-2 中做出了说明。

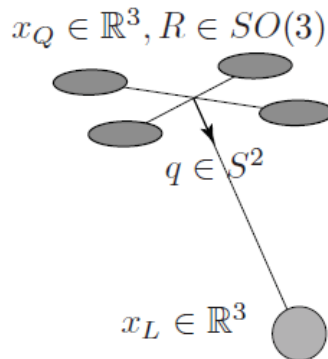


图 2-2 无人机-悬挂物系统

下面本文将在上一节无人机动力学模型的基础上，对无人机-悬挂物系统进

行联合动力学建模推导。为了简化问题便于分析，方便本文的推导，我们对无人机-悬挂物系统做出如下的假设：

- (1) 四旋翼和悬挂物都是刚体并且多旋翼无人机是结构对称的；
- (2) 绳子质量和空气的影响都可以忽略；
- (3) 绳子是无弹性的，并且绳子的结点位于无人机机体中心。

在目标跟踪过程中，无人机和负载之间存在耦合关系，无人机-悬挂负载系统有八个自由度。下面根据以上假设，对无人机-悬挂物系统进行动力学建模。

表 2-2 无人机-悬挂物系统的变量

参数名称	参数值
无人机质量	$m_Q \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的惯性矩阵	$J_Q \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$
无人机在机体坐标系下的惯性矩阵	$R \in SO(3)$
无人机角速度	$\Omega \in \mathbb{R}^3$
无人机位置	$x_Q \in \mathbb{R}^3$
无人机线速度	$v_Q \in \mathbb{R}^3$
无人机在机体坐标系整体上升力	$f \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的力矩	$M \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载线速度	$v_L \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载角速度	$w \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载质量	$m_L \in \mathbb{R}$
绳子长度	$l \in \mathbb{R}$
悬挂负载位置	$x_L \in \mathbb{R}^3$
绳子方向	$q \in S^2 \subset \mathbb{R}^3$

对于无人机动力学建模，有两种较为成熟就经常使用的办法，一种为 Newton-Euler 方法，另一种为经典 Euler-Lagrange 方程法。由于 Newton-Euler 方法只有在已知作用于刚体的力和力矩的情况下进行建模，而无人机-悬挂物系

统是由两个刚体组成，很难对无人机与悬挂物之间的力和力矩进行建模<sup>[57]</sup>。Euler-Lagrange 法是依据系统动能与势能总能量守恒建立拉格朗日方程，并由此方程对整个系统动力学方程进行推导，因此本文将基于 Euler-Lagrange 的方法对无人机-悬挂物系统进行动力学模型的推导与求取。针对图 2-2 中给出的化简后的无人机-悬挂物系统模型，观察图中变量，我们定义无人机质心位置与悬挂物质心位置以及绳子长度和绳子上的单位向量  $\mathbf{q}$  有如下的关系：

$$\mathbf{x}_Q = \mathbf{x}_L - l\mathbf{q} \quad (2-6)$$

对式 (2-6) 两边同时进行导数计算：

$$\mathbf{v}_L = \dot{\mathbf{x}}_L \quad (2-7)$$

根据式 (2-7) 得到的悬挂物的线速度，下面计算整个系统在世界坐标系下的整体动能  $\mathbf{F}$ ：

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \frac{1}{2}m_Q\mathbf{v}_Q \cdot \mathbf{v}_Q + \frac{1}{2}m_L\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \\ &= \frac{1}{2}m_Q(\mathbf{v}_L - l\dot{\mathbf{q}}) \cdot (\mathbf{v}_L - l\dot{\mathbf{q}}) + \frac{1}{2}m_L\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \\ &= \frac{1}{2}(m_Q + m_L)\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L - m_Q l\mathbf{v}_L \cdot \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}m_Q l^2 \dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \end{aligned} \quad (2-8)$$

这里符号  $\cdot$  表示点乘，即对  $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^3$  有  $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{x}^T \mathbf{y}$ 。然后计算整个系统的总势能  $\mathbf{U}$ ：

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= m_Q g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_Q + m_L g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L \\ &= m_Q g \mathbf{e}_3 \cdot (\mathbf{x}_L - l\mathbf{q}) + m_L g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L \\ &= (m_Q + m_L)g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L - m_Q g l \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{q} \end{aligned} \quad (2-9)$$

由式(2-8)和(2-9)可以计算出拉格朗日函数  $\mathbf{L} = \mathbf{F} - \mathbf{U}$ ，根据整个系统满足拉格朗日-达朗贝尔 (Lagranged'Alembert) 原理：

$$\delta \int_0^\tau \mathbf{L} dt + \int_0^\tau (\mathbf{M} \cdot \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 \cdot f \mathbf{R} \mathbf{e}_3) dt = 0$$

这里的  $f$  表示沿  $-\vec{\mathbf{b}}_3$  方向上的无人机所受的总的升力， $\mathbf{M}$  表示整个系统在机体坐标系下所受的力矩， $\mathbf{W}_1 = \mathbf{R}^T \delta \mathbf{R}$ ， $\mathbf{W}_2 = \delta \mathbf{x}_Q = \delta \mathbf{x}_L - l \delta \mathbf{q}$  为虚功，带入上式得到：

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau (f\mathbf{Re}_3 \cdot \delta\mathbf{W}_1 + \delta\mathbf{W}_2 + \delta\mathbf{F} - \delta\mathbf{U})dt \\ &= \int_0^\tau (f\mathbf{Re}_3 \cdot (\delta\mathbf{x}_L - l\delta\mathbf{q}) + \mathbf{M} \cdot (\mathbf{R}^T \delta\mathbf{R}) + ((m_Q + m_L)\mathbf{v}_L - m_Q l\dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta\mathbf{v}_L \\ & \quad + (-m_Q l\mathbf{v}_L + m_Q l^2 \dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta\dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{J}_Q \cdot \delta\boldsymbol{\Omega} - (m_Q + m_L)g\mathbf{e}_3 \cdot \delta\mathbf{x}_L + m_Q g l \mathbf{e}_3 \cdot \delta\mathbf{q}) dt = 0 \end{aligned}$$

化简后：

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau ((m_Q + m_L)\mathbf{v}_L - m_Q l\dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta\mathbf{v}_L + (f\mathbf{Re}_3 - (m_Q + m_L)g\mathbf{e}_3) \delta\mathbf{x}_L dt \\ & + \int_0^\tau ((m_Q l^2 \dot{\mathbf{q}} - m_Q l\mathbf{v}_L) \cdot \delta\dot{\mathbf{q}} + (m_Q g l \mathbf{e}_3 - f l \mathbf{Re}_3) \cdot \delta\mathbf{q}) dt \\ & + \int_0^\tau (\boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{J}_Q \delta\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{M}(\mathbf{R}^T \delta\mathbf{R})) dt \\ & = 0 \end{aligned}$$

经化简后<sup>[55]</sup>得到整个系统的动力学方程如下<sup>[25]</sup>。

$$(m_Q + m_L)(\dot{\mathbf{v}}_L + g\mathbf{e}_3) = (\mathbf{q} \cdot f\mathbf{Re}_3 - m_Q l(\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}}))\mathbf{q} \quad (2-10)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{w} \times \mathbf{q} \quad (2-11)$$

$$m_Q l \dot{\mathbf{w}} = -\mathbf{q} \times f\mathbf{Re}_3 \quad (2-12)$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\Omega}} \quad (2-13)$$

$$\mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (2-14)$$

至此，我们得到了无人机-悬挂物系统的动力学方程，该动力学方程是后面无人机-悬挂物姿态控制器设计的基础。

## 2.2 视觉跟踪系统模型

在无人机-悬挂物运输过程中，无人机一方面需要通过前置相机得到的视觉反馈实时跟踪运输目标，另一方面需要通过朝下的相机实时观测悬挂负载的摆动作为反馈控制去控制悬挂物的摆动。由于前置相机光心与无人机质心存并不重合，因此，需要对无人机-相机进行几何建模。相机观测到的悬挂物为二维坐标，而控制器实际需要得到的反馈量为三维世界坐标。因此需要设计相机-悬挂物几何模型，结合绳子长度和二维图像坐标信息去估计悬挂物的三维坐标信息。

### 2.2.1 无人机-相机模型

本文将相机水平放置于无人机正前方，相机坐标系 $(x_c, y_c, z_c)$ 和无人机坐标系 $(x_m, y_m, z_m)$ 的对应关系如图 2-3 所示。无人机坐标系 $x$ 轴与相机坐标系 $z$ 轴处于平行状态。

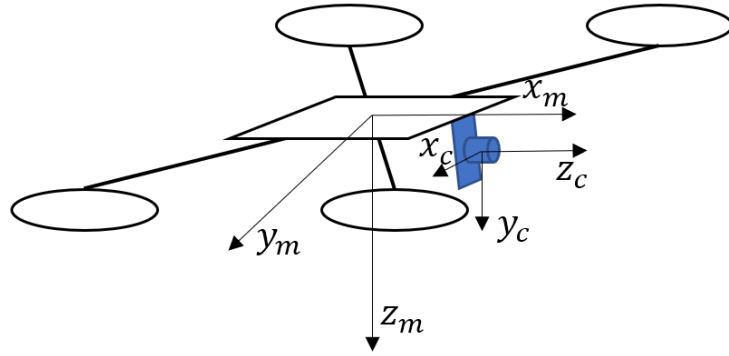


图 2-3 无人机-相机坐标示意图

如图 2-4 所示，当跟踪目标位置发生变化时，目标在图像平面的坐标  $(u, v)$ ，以及目标框在图像平面的面积  $f_{\Delta}$  随之改变。由于相机坐标系的  $z$  轴与无人机坐标系的  $x$  轴重合。

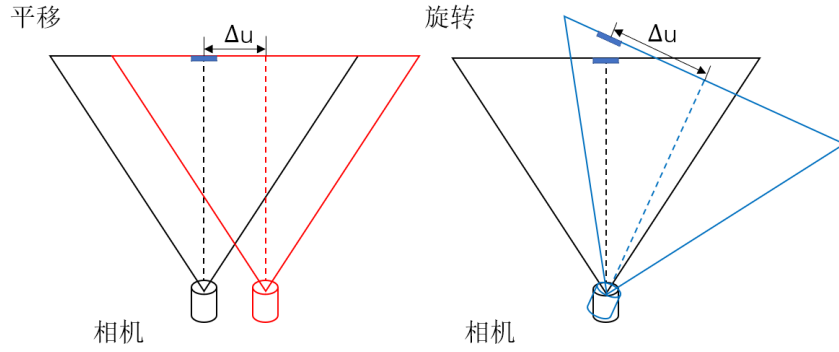


图 2-4 无人机自由度耦合示意图

由此图 2-4 可以看出，当目标框在图像平面内产生  $\Delta u$  的像素偏移量时，这是由相机旋转和水平方向移动共同产生的。因此图像平面的误差  $\Delta u$  对应着无人机姿态控制的两个自由度，系统存在耦合。

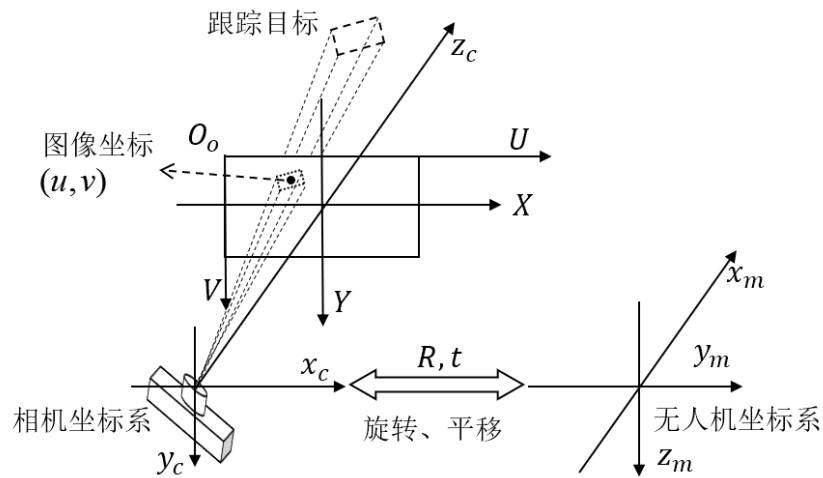


图 2-5 无人机-相机模型

根据图 2-5 所示几何关系可以得到无人机的位置与目标框的图像坐标关系以及无人机的姿态与目标框的图像坐标关系：当无人机沿  $x$  轴移动时，目标框的图像坐标  $f_{\Delta}$  发生变化。当无人机沿  $y$  轴移动时，目标框的图像坐标  $u$  发生变化。当无人机沿  $z$  轴移动时，目标框的图像坐标  $v$  发生变化。当无人机横滚角（roll）发生变化时，目标框的图像坐标不发生变化。当无人机俯仰角（pitch）发生变化时，目标框的图像坐标  $v$  发生变化。当无人机偏航角（yaw）发生变化时，目标框的图像坐标  $u$  发生变化。因此在设计视觉跟踪控制器时需要对系统进行解耦。

### 2.2.2 相机-悬挂物模型

由于悬绳长度远远大于焦距以及悬绳系点与光心距离，因此假设光心悬绳系点相重合，由此模型如图 2-6 所示：

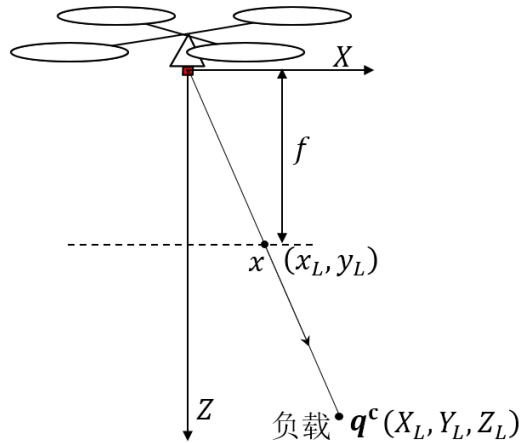


图 2-6 相机悬挂物模型

由针孔相机模型可以得到相机坐标系与像素物理平面坐标关系：

$$\begin{cases} \frac{x_L}{f} = \frac{X_L}{Z_L} \\ \frac{y_L}{f} = \frac{Y_L}{Z_L} \end{cases} \quad (2-15)$$

其中  $X_L$ 、 $Y_L$ 、 $Z_L$ ——表示悬挂物在相机坐标系下世界坐标；

$x_L$ 、 $y_L$ ——表示悬挂物在图像平面的坐标；

$f$ ——相机焦距；

相机坐标系下的悬绳单位方向向量  $q^c$ ：



$$\mathbf{q}^c = \frac{(X_L, Y_L, Z_L)^T}{\|(X_L, Y_L, Z_L)^T\|} = \frac{(\frac{X_L}{Z_L}, \frac{Y_L}{Z_L}, 1)}{\|(\frac{X_L}{Z_L}, \frac{Y_L}{Z_L}, 1)\|} \quad (2-16)$$

将 (2-15) 式带入 (2-16) 式中并且根据单目相机投影模型得到：

$$\mathbf{q}^c = \frac{(\frac{x_L}{f}, \frac{y_L}{f}, 1)^T}{\|(\frac{x_L}{f}, \frac{y_L}{f}, 1)\|} = \frac{(\frac{\Delta u \cdot d_x}{f}, \frac{\Delta v \cdot d_y}{f}, 1)^T}{\|(\frac{\Delta u \cdot d_x}{f}, \frac{\Delta v \cdot d_y}{f}, 1)\|} \quad (2-17)$$

这里的  $\Delta u = u - u_0$ 、 $\Delta v = v - v_0$  分别为悬挂物在像素平面的偏移量， $d_x$ 、 $d_y$  分别为针孔投影模型中的参数，表示在 x、y 方向单个像素的物理长度。 $f$  表示相机的焦距，可以通过相机的标定得到。我们需要将  $\mathbf{q}^c$  转换成世界坐标系下的  $\mathbf{q}^w$ ：

$$\mathbf{q}^w = \mathbf{R}_q^w \mathbf{R}_c^q \mathbf{q}^c \quad (2-18)$$

其中  $\mathbf{R}_q^w$  ——表示无人机在世界坐标系下的姿态；

$\mathbf{R}_c^q$  ——表示相机坐标系到无人机坐标系的变换；

$\mathbf{R}_q^w$  可以由运动捕捉系统提供，因此我们只需要求得  $\mathbf{R}_c^q$  即可。由于摄像头固定于机体下方垂直向下，光心 z 轴基本与无人机 z 轴重合，因此采用无人机的欧拉角表示，按照滚动  $\gamma$ -俯仰  $\beta$ -偏航角  $\alpha$  的旋转结果可以得到：

$$\mathbf{R}_c^q = \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\alpha) \quad (2-19)$$

其中  $\mathbf{R}_z(\gamma)$  ——表示绕 z 轴旋转  $\gamma$  度的旋转矩阵；

$\mathbf{R}_y(\beta)$  ——表示绕 y 轴旋转  $\beta$  度的旋转矩阵；

$\mathbf{R}_x(\alpha)$  ——表示绕 x 轴旋转  $\alpha$  度的旋转矩阵；

其中，根据图 2-7 所示相机坐标系与机体坐标系之间的关系，可以得到  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的取值分别  $-180^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-90^\circ$ ，因此可以得到式 (2-20)：

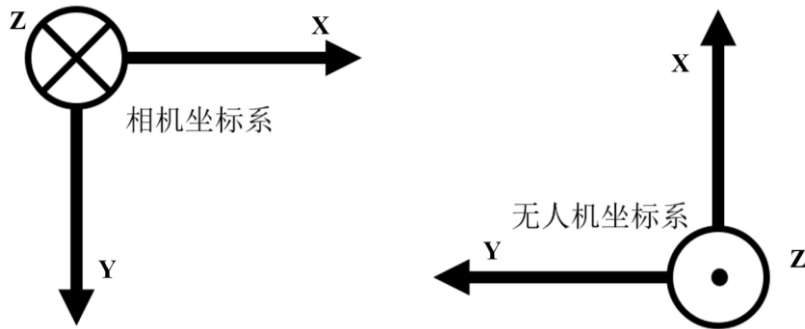


图 2-7 相机坐标系与无人机坐标系之间关系

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_z(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-20}$$

求得  $\mathbf{R}_c^q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ ，既此可以求得世界坐标系下悬绳单位方向向量  $\mathbf{q}^w$ 。由于

控制器还需要悬绳单位向量  $\mathbf{q}^w$  的导数  $\dot{\mathbf{q}}^w$ ，对  $\mathbf{q}^w$  求导可得式 (2-21)：

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{q}}^w &= \dot{\mathbf{R}}_q^w \mathbf{R}_c^q \mathbf{q}^c + \mathbf{R}_q^w \mathbf{R}_c^q \dot{\mathbf{q}}^c \\
 &= \mathbf{R}_q^w [{}^q\boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{R}_c^q \mathbf{q}^c + \mathbf{R}_q^w \mathbf{R}_c^q \frac{(\frac{\Delta \dot{u} \cdot d_x}{f}, \frac{\Delta \dot{v} \cdot d_y}{f}, 1)^T}{\|(\frac{\Delta u \cdot d_x}{f}, \frac{\Delta v \cdot d_y}{f}, 1)\|}
 \end{aligned} \tag{2-21}$$

其中  ${}^q\boldsymbol{\omega}$ ——表示机体角速度；

由此模型可以求得悬绳单位向量在世界坐标系下的表示  $\mathbf{q}^w$ ，以及悬绳单位向量的导数在世界坐标系下的表示  $\dot{\mathbf{q}}^w$ ，这两个量都用来作为无人机-悬挂物姿态控制器的反馈量。

## 2.3 本章小结

本章主要完成四旋翼无人机的动力学建模，通过 Euler-Lagrange 方程推导建立了无人机-悬挂物的动力学模型。针对相机与无人机坐标关系对无人机-相机模型进行分析，讨论了无人机运动与目标框图像坐标的对应关系。根据相机与悬挂物位置关系，建立了相机-悬挂物几何模型，并且推导了单位悬绳方向向量求解公式。在接下来的无人机-悬挂物控制器设计以及无人机-悬挂物视觉跟踪控制器设计中将以本章建立模型为依据，设计控制器。

## 第 3 章 无人机-悬挂物飞行控制器设计

本章根据上一章建立无人机-悬挂物动力学模型设计无人机-悬挂物姿态控制器。为稳定跟踪过程中负载的摆动，减小负载摆动对无人机飞行的影响，保证无人机-悬挂物系统在跟踪过程中的稳定性，在对无人机位置控制的基础上，加入了对悬挂负载位置的控制以及悬绳方向的控制，并根据动力学方程，将系统的前馈量融入到控制律中。

由于无人机-悬挂物控制器需要悬绳的单位方向向量及其导数作为反馈，因此本文使用相机去获得悬挂物的位置反馈。

### 3.1 基于改进 CamShift 算法的悬挂物位置估计

由于的无人机-悬挂物姿态控制器需要悬绳单位方向向量  $\mathbf{q}$  和  $\dot{\mathbf{q}}$  作为反馈量，现有的研究中，均采用外部传感器系统，例如运动捕捉系统来获得。由于外部传感器方式在实际应用中无法有效使用，本文提出通过在机体底部安装垂直向下的摄像头，获取并处理图像计算得到悬挂物反馈量。为了准确从图像中获取悬挂重物的像素坐标，本文基于传统的 CamShift<sup>[36]</sup>颜色跟踪算法，融合卡尔曼滤波，可以有效提升算法的鲁棒性。通过对悬挂物的跟踪，基于第二章相机和悬挂物的模型及公式（2-17）和公式（2-20），将二维像素坐标转换为控制器需要的悬绳方向向量。

整个系统流程框图如图 3-1 所示，CamShift 全称（Continuously Adaptive Mean-Shift）是 MeanShift 算法的改进版本，基本思想是对视频流中每一帧图像做 Mean-Shift 运算，并且将前一帧计算得到的结果传递给下一帧作为下一帧搜索框的初始值，如此迭代进行。由于这是一个迭代的过程，中间没有纠正的环节，目标的跟踪的累积误差会越来越大，一旦跟丢一次就会严重影响下一次迭代的初始值使得下一次跟踪更加糟糕。基于这个问题，本文在每一次迭代的过程中加入了 Kalman 滤波。将前一帧计算得到的跟踪框位置作为当前帧的预测量，并将当前帧 Mean-Shift 计算得到的目标框位置做为测量量进行 Kalman 滤波，然后将滤波后的目标框位置传给下一帧。

LBP（Local Binary Pattern）作为广泛使用的一种特征描述算子，其计算如图 3-2 所示，遍历图像中的每一个像素点，并且以当前像素点的灰度值作为一个阈值，对周围的领域 8 个像素点进行二值化，并且按照设定好的顺序将 8 个值组成一个二进制数，然后将其转化为十进制值作为当前像素点的响应值。经过一轮遍历后，将会得到一个 LBP 响应图像也称为 LBP 统计直方图。

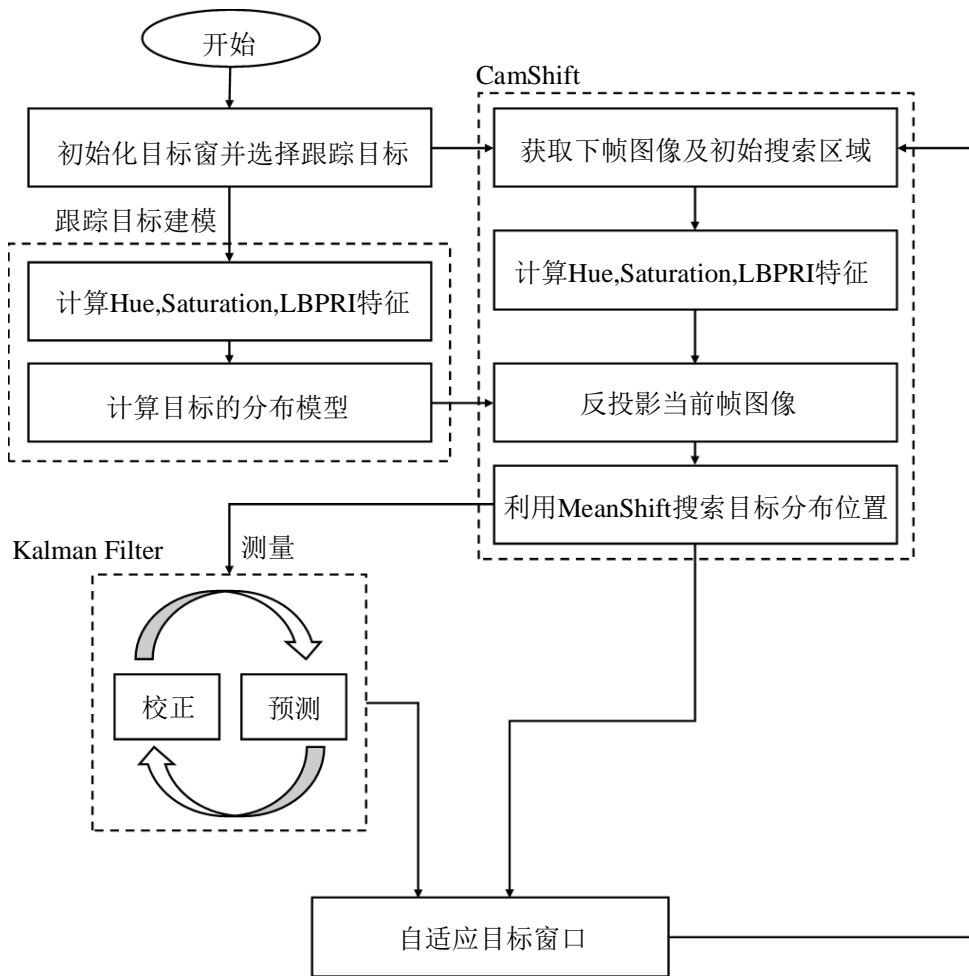


图 3-1 CamShift-Kalman 跟踪系统流程图

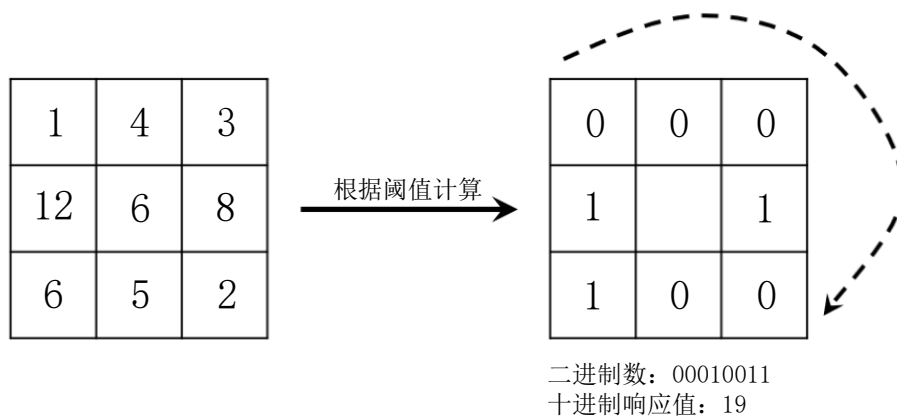


图 3-2 LBP 特征计算

将图像转换到 **HSV** 空间下可以得到图像的 **HUE** 颜色特征以及图像的 **SAT** 饱和度特征。根据不同情况需要选择不同使用不同的特征，分别计算三种特的

反投影图，如图 3-3 所示。从左至右分别为 HUE 颜色特征、SAT 饱和特征以及 LBP 纹理特征，可以看到 Hue 颜色特征的反投影图中，悬挂物与背景的对比更为明显。因此采用 HUE 颜色特征生成反投影图进行 Mean-Shift 算法跟踪。

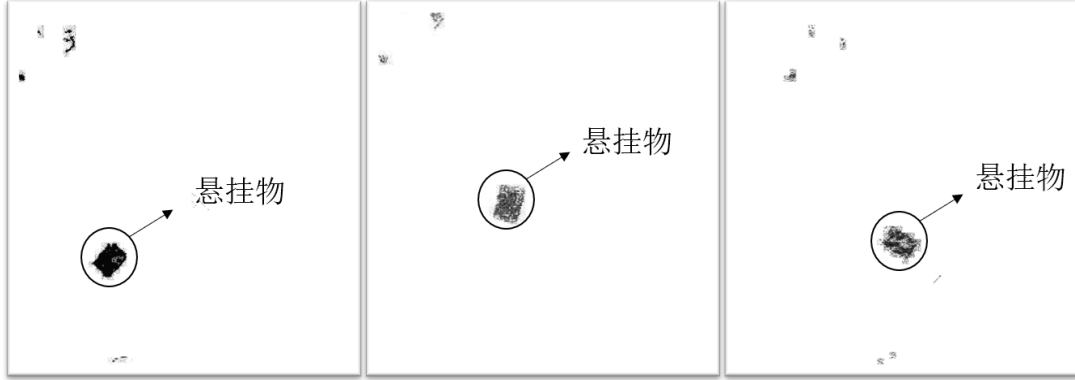


图 3-3 三种反投影图示意图

Mean-Shift 算法是基于密度函数梯度估计的非参数方法，通过不断迭代寻找概率最大的位置。算法的流程为：

- (1) 在特征概率分布图中选取搜索框  $W$ 。
- (2) 计算 Mean-Shift 向量。

$$M_{00} = \sum_x \sum_y P(\text{Hue}(x, y)) \quad (3-1)$$

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xP(\text{Hue}(x, y)) \quad (3-2)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y yP(\text{Hue}(x, y)) \quad (3-3)$$

$$m(x, y) = \left[ \frac{M_{10}}{M_{00}} - x, \frac{M_{01}}{M_{00}} - y \right] \quad (3-4)$$

- (3) 计算新的中心  $(x_{k+1}, y_{k+1}) = (x_k, y_k) + m(x_k, y_k)$
- (4) 将搜索框的中心移动到新的中心，若超过了移动的预设阈值，则重复进行 (2) (3) (4) 步骤，直到距离小于一定的误差范围内。

将 Mean-Shift 算法应用于视频流就成为了 CamShift 算法，其基本流程为：

- (1) 初始化搜索框  $W$ 。
- (2) 计算搜索框的反向投影图。
- (3) 执行 Mean-Shift 算法，定位搜索框的新的位置。
- (4) 在下一帧中将搜索框的位置作为初始化位置，并通过图像二阶距计算新的搜索框的大小。

$$\begin{aligned} width &= \max(l \cos \theta, w \sin \theta) \\ height &= \max(l \sin \theta, w \cos \theta) \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \\ v'_{xk} \\ v'_{yk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ v_{xk-1} \\ v_{yk-1} \end{bmatrix} + w_{k+1} \quad (3-6)$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \\ v'_{xk} \\ v'_{yk} \end{bmatrix} + v_k \quad (3-7)$$

The diagram illustrates the control architecture of the proposed system. It consists of several interconnected blocks:

- 无人机电位置控制器 (UAV Position Controller)**: Receives the desired position  $x^d$  and outputs the UAV position  $x$ , velocity  $v$ , and attitude  $q$ .
- 无人机-悬挂物姿态控制器 (UAV-Hanging Object Attitude Controller)**: Receives the UAV position  $x$ , velocity  $v$ , and attitude  $q$ , and outputs the force  $F_n$  and the attitude error  $R e_3$ .
- 姿态解析 (Attitude Parsing)**: Receives the attitude error  $R e_3$  and outputs the rotation matrix  $R_c$ .
- 无人机姿态控制 (UAV Attitude Control)**: Receives the rotation matrix  $R_c$  and outputs the desired torque  $\tau_d$ .
- 分配模型 (Allocation Model)**: Receives the desired torque  $\tau_d$  and outputs the desired acceleration  $n_d$ .
- 无人机悬挂物 (UAV Hanging Object)**: Receives the desired acceleration  $n_d$  and outputs the actual acceleration  $a$ .

The overall control loop involves calculating the total force  $F = F_n + F_{pd}$  and the resulting acceleration  $f = F R e_3$ , which are used to update the UAV's position and velocity.

-22-

无人机位置及速度误差：

$$\mathbf{e}_{x_Q} = \mathbf{x}_Q - \mathbf{x}_Q^d \quad (3-8)$$

$$\mathbf{e}_{v_Q} = \mathbf{v}_Q - \mathbf{v}_Q^d \quad (3-9)$$

其中  $\mathbf{x}_Q$  ——表示无人机当前位置；

$\mathbf{x}_Q^d$  ——表示无人机期望位置；

$\mathbf{v}_Q$  ——表示无人机当前速度；

$\mathbf{v}_Q^d$  ——表示无人机期望速度；

悬挂负载位置及速度误差：

$$\mathbf{e}_{x_L} = \mathbf{x}_L - \mathbf{x}_L^d \quad (3-10)$$

$$\mathbf{e}_{v_L} = \mathbf{v}_L - \mathbf{v}_L^d \quad (3-11)$$

其中  $\mathbf{x}_L$  ——表示悬挂物当前位置；

$\mathbf{x}_L^d$  ——表示悬挂物期望位置；

$\mathbf{v}_L$  ——表示悬挂物当前速度；

$\mathbf{v}_L^d$  ——表示悬挂物期望速度；

根据两个误差量可以设计无人机-悬挂物位置控制器 PD 控制律：

$$\mathbf{F}_n = -\mathbf{k}_{x_Q} \mathbf{e}_{x_Q} - \mathbf{k}_{v_Q} \mathbf{e}_{v_Q} - \mathbf{k}_{x_L} \mathbf{e}_{x_L} - \mathbf{k}_{v_L} \mathbf{e}_{v_L} \quad (3-12)$$

其中  $\mathbf{k}_{x_Q}$  ——表示无人机 PD 控制器位置比例系数；

$\mathbf{k}_{v_Q}$  ——表示无人机 PD 控制器速度比例系数；

$\mathbf{k}_{x_L}$  ——表示悬挂负载 PD 控制器位置比例系数；

$\mathbf{k}_{v_L}$  ——表示悬挂负载 PD 控制器速度比例系数；

### 3.2.2 无人机-悬挂物姿态控制环设计

在无人机-悬挂物系统运行过程中，除了时刻控制悬挂物的位置外，还需要考虑悬绳的方向。将悬绳的方向控制引入无人机姿态控制器中，通过无人机的姿态调节可以更快速的减小悬挂物的摆动。首先定义悬绳方向误差项：

$$\mathbf{e}_q = \mathbf{q}^2 \mathbf{q}_d \quad (3-13)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_q = \dot{\mathbf{q}} - (\mathbf{q}_d \times \dot{\mathbf{q}}_d) \times \mathbf{q} \quad (3-14)$$

其中  $\mathbf{q}$  ——表示悬绳单位方向向量当前值；

$\mathbf{q}_d$  ——悬绳单位方向向量期望值；

$\dot{q}$ ——表示悬绳单位方向向量导数当前值；

$\dot{q}_d$ ——表示悬绳单位方向向量导数期望值；

根据悬绳方向的误差项设计 PD 控制律：

$$\mathbf{F}_{pd} = -\mathbf{k}_q \mathbf{e}_q - \mathbf{k}_\omega \mathbf{e}_{\dot{q}} \quad (3-15)$$

其中  $\mathbf{k}_q$ ——表示悬绳方向 PD 控制器方向比例系数；

$\mathbf{k}_\omega$ ——表示悬绳方向 PD 控制器方向导数比例系数；

由系统的动力学方程（2-10）可以推导出系统的前馈量<sup>[24]</sup>：

$$\mathbf{F}_{ff} = m_Q l \langle \mathbf{q}, \mathbf{q}_d \times \dot{\mathbf{q}}_d \rangle (\mathbf{q} \times \dot{\mathbf{q}}) + m_Q l (\mathbf{q}_d \times \ddot{\mathbf{q}}_d) \times \mathbf{q} \quad (3-16)$$

其中  $m_Q$ ——表示无人机的质量；

$l$  ——表示悬绳长度；

$\ddot{\mathbf{q}}_d$ ——表示期望悬绳方向单位向量二阶导数，在系统中默认为 0；

系统所受合力为：

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n - \mathbf{F}_{pd} - \mathbf{k}_{ff} \mathbf{F}_{ff} \quad (3-17)$$

其中  $\mathbf{F}_n$ ——表示无人机位置控制量以及悬挂负载位置控制量；

$\mathbf{F}_{pd}$ ——表示悬绳方向控制量；

$\mathbf{F}_{ff}$ ——表示系统前馈控制量；

$\mathbf{k}_{ff}$ ——表示系统前馈控制量比例系数；

由于在实际飞行过程中，如果前馈量过大，会导致无人机-悬挂物系统在起飞过程中发散。因此，将前馈量乘以一个比例系数  $\mathbf{k}_{ff}$ ，用于实际飞行实验时调节前馈量的大小，保证无人机-悬挂物在起飞阶段平稳起飞。

### 3.2.3 无人机姿态控制环设计

根据无人机-悬挂物系统所受合力  $\mathbf{F}$  可以求得无人机沿机体  $z$  轴方向上所受力  $f_z$ ：

$$f_z = \mathbf{F} \cdot \mathbf{Re}_3 \quad (3-18)$$

根据无人机-悬挂物系统沿机体  $z$  轴所受合力可以得到无人机  $z$  轴的期望方向  $\vec{b}_{3c}$ ：

$$\vec{b}_{3c} = \frac{f_z}{\|f_z\|} \quad (3-19)$$

根据无人机-悬挂物位置控制环偏航角输入量可以得到期望无人机机头朝向  $\vec{b}_{1d}$ ，由此可以计算得到无人机姿态方向  $\vec{b}_{2c}$ ：



$$\vec{b}_{2c} = \frac{\vec{b}_{3c} \times \vec{b}_{1d}}{\|\vec{b}_{3c} \times \vec{b}_{1d}\|} \quad (3-20)$$

为了使得无人机期望姿态满足右手定则，则重新计算  $\vec{b}_{1c}$ ：

$$\vec{b}_{1c} = \vec{b}_{2c} \times \vec{b}_{3c} \quad (3-21)$$

由此可以得到无人机-悬挂物系统的期望姿态矩阵  $\mathbf{R}_c = [\vec{b}_{1c}, \vec{b}_{2c}, \vec{b}_{3c}]$ ，定义无人机姿态误差：

$$\mathbf{e}_R = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_c^T \mathbf{R} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_c)^\vee \quad (3-22)$$

其中  $\mathbf{R}$  ——表示无人机当前姿态矩阵；

符号  $^T$  ——矩阵的转置；

符号  $^\vee$  ——表示反对称矩阵，具体形式为  $\mathbf{x}^\vee = [\mathbf{x}]_\times = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}$ ；

由无人机姿态误差  $\mathbf{e}_R$  可以求得无人机期望角速度  $\boldsymbol{\Omega}_c$ ：

$$\boldsymbol{\Omega}_c = k_\Omega \mathbf{e}_R \quad (3-23)$$

定义无人机的角速度误差为：

$$\mathbf{e}_\Omega = \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_c \boldsymbol{\Omega}_c \quad (3-24)$$

其中  $\boldsymbol{\Omega}$  ——表示当前无人机角速度；

$\boldsymbol{\Omega}_c$  ——表示期望无人机角速度；

根据无人机角速度误差可以设计 PD 控制律，由此获得无人机-悬挂物系统期望力矩  $\mathbf{M}$ ：

$$\mathbf{M} = \mathbf{k}_p \mathbf{e}_\Omega + \mathbf{k}_d \frac{\Delta \boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega}_{ff} \quad (3-25)$$

其中  $\mathbf{k}_p$  ——表示无人机姿态控制器角速度比例系数；

$\mathbf{k}_d$  ——表示无人机姿态控制器角加速度比例系数；

$\frac{\Delta \boldsymbol{\Omega}}{dt}$  ——表示无人机姿态控制器角加速度；

$\boldsymbol{\Omega}_{ff}$  ——表示无人机姿态控制器前馈量；

### 3.3 本章小结

本章根据第二章提出的无人机-悬挂物动力学模型设计无人机-悬挂物飞行控制器。考虑了悬挂物摆动对无人机飞行的影响，融合悬挂物的位置误差以和

无人机的位置误差设计了无人机-悬挂物位置控制器环。将悬绳方向融入到无人机-悬挂物姿态控制器中，根据悬绳方向向量的误差设计 **PD** 控制律，并且在无人机-悬挂物姿态控制环加入了由系统动力学方程推导出的系统前馈量。根据无人机自身姿态误差设计无人机姿态控制环。最后将各个控制环连接起来，设计了无人机-悬挂物系统飞行控制器。

## 第 4 章 无人机-悬挂物视觉跟踪系统控制器设计

在无人机-悬挂物系统可以保持稳定飞行后，需要通过视觉跟踪目标来完成运输任务。本章针对无人机-悬挂物运输任务的跟踪运输过程设计了基于 TLD 的视觉跟踪控制器，对目标进行精确跟踪。

### 4.1 基于 TLD 的目标视觉跟踪

无人机-悬挂物系统在追踪过程中，需要面对长时间追踪的情况。目前国外很多基于相关滤波和深度学习的视觉追踪算法虽然跟踪效果很好并且完全优于传统的判别式算法，但是这些算法大都只是在短期的跟踪效果（100 帧到 500 帧之间）较为突出。而对于长期的目标追踪，需要在跟踪过程中能够不断的自动纠正跟踪目标，对算法的鲁棒性要求更高。综合考虑，我们选择了较为经典的视觉跟踪算法 TLD（Tracking-Learning-Detection）。并且根据 TLD 的跟踪结果设计视觉跟踪控制器，使得无人机可以长时间对跟踪目标进行视觉跟踪。

TLD（Tracking-Learning-Detection）<sup>[38]</sup>目标追踪算法是 2011 年由英国萨里大学的博士 Zdenek Kalal 提出的单目标长时间追踪算法。该算法的优势在于其结合了跟踪与检测两种算法去解决在跟踪时目标出现变化或者目标被挡住的情况。同时该算法加入了学习的过程，使得跟踪的效果更加稳定可靠，鲁棒性更强。

整个 TLD 系统分为跟踪模块与检测模块，简单的说，跟踪模块就是根据目标在前一帧中的位置来预测目标在当前帧的位置。而检测模块就是根据目标的先验信息，也就是指目标特征，来检测目标在当前帧中的位置。整个算法流程如图 4-1 所示：

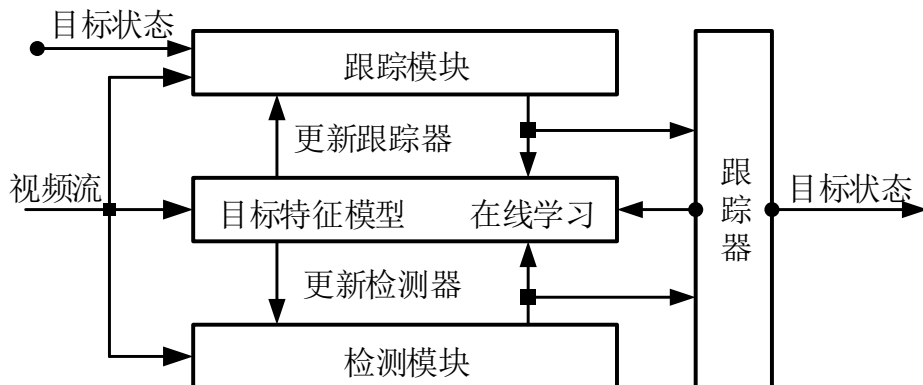


图 4-1 TLD 算法基本框架

在 TLD 算法的整个运行过程中，检测模块与跟踪模块始终相互影响。跟踪器认为目标在视野中每两帧内的位移是有限的，并且视野中的目标始终是可以被看见的。如果此时目标的进行了大幅度的位移，导致了目标离开了视野，这将会导致跟踪失败。检测器假设相邻两帧之间的目标都是不相关的，以学习器训练学习得到的目标模型为依据，对整张图进行检测搜索来寻找预测目标将会出现的位置。跟其他的检测算法相同，TLD 的检测器将会出现漏检和错检两种情况，而此时的学习器将会通过跟踪器得到的目标的位置来对错检和漏检这两种情况进行计算，综合计算后更新得到目标的具体位置，与此同时也对目标模型进行更新，强化目标模型的准确性。

## 4.2 基于 TLD 算法的无人机-悬挂物视觉跟踪控制器

对于无人机视觉伺服的研究，主要分为基于图像的视觉伺服（Image Based Visual Servo）和基于位置的视觉伺服（Position Based Visual Servo），这两种方法的主要区别在于控制输入误差主要来源是图像空间还是三维空间。由于 TLD 跟踪算法难以准确估计深度信息，因此本文针对 TLD 算法设计了基于图像平面的视觉跟踪控制器。

从 TLD 算法跟踪模块可以得到跟踪目标框（bounding box）如图 4-2 所示：

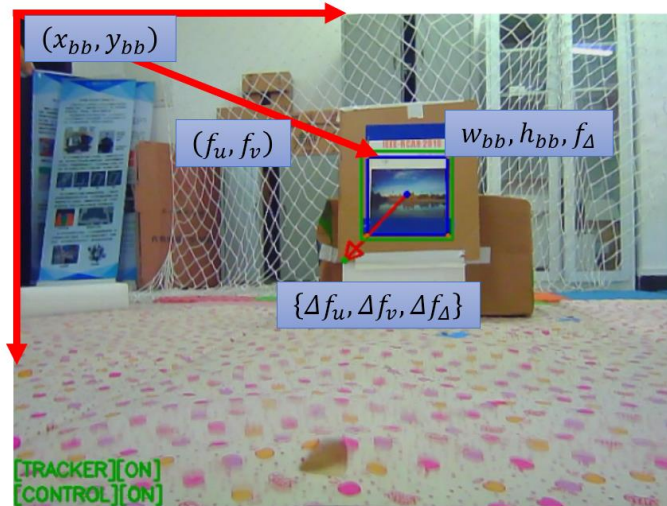


图 4-2 TLD 目标追踪界面

$(x_{bb}, y_{bb})$  表示图像中目标框的左上角像素坐标， $w_{bb}$ 、 $h_{bb}$  分别表示图像的长和宽。通过（4-1）式可以求得目标框中心的归一化图像表征  $(f_u, f_v, f_d)$ ：

$$\begin{aligned}
 f_u &= \frac{x_{bb} + (w_{bb} / 2)}{w_{im}} \\
 f_v &= \frac{y_{bb} + (h_{bb} / 2)}{h_{im}} \\
 f_{\Delta} &= \sqrt{\frac{w_{im} \cdot h_{im}}{w_{bb} \cdot h_{bb}}}
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

其中  $f_u$  ——表示跟踪目标框中心像素横坐标；  
 $f_v$  ——表示跟踪目标框中心像素纵坐标；  
 $f_{\Delta}$  ——表示跟踪目标框大小与图像大小比值；  
 $w_{im}$  ——表示图像宽度；  
 $h_{im}$  ——表示图像高度；

通过式 (4-1) 获得的当前目标框图像表征与期望量相减可以得到图像平面误差量  $(\Delta f_u, \Delta f_v, \Delta f_{\Delta})$ ：

$$\begin{aligned}
 \Delta f_u &= f_u - f_{u_0} \\
 \Delta f_v &= f_v - f_{v_0} \\
 \Delta f_{\Delta} &= f_{\Delta} - f_{\Delta_0}
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

其中  $f_{u_0}$  ——表示图像中心像素横坐标；  
 $f_{v_0}$  ——表示图像中心像素纵坐标；  
 $f_{\Delta_0}$  ——表示期望目标框大小与图像大小比值；

由式 (4-2) 计算得到 3 个误差量，将其作为视觉跟踪控制的控制量输入。根据第二章分析无人机-相机模型得到，图像平面误差量  $(\Delta f_u, \Delta f_v, \Delta f_{\Delta})$  与无人机-悬挂物系统自身控制量  $(x, y, z, yaw)$  是存在耦合的，因此在设计控制器之前需要对系统进行解耦。图像归一化平面如图 4-3 所示，图中  $\psi_{telem}$  表示无人机的偏航角， $\psi_{telemref}$  是无人机上一次命令处理循环的偏航角。 $\theta_{telem}$  表示无人机飞行过程中的俯仰角， $\theta_{centroidref}$  表示无人机飞行时的参考俯仰角，由于无人机飞行时始终处于相对稳定状态，因此  $\theta_{centroidref}$  始终为 0。以偏航角为例，偏航角变化  $\Delta\psi$  与水平相机视场的角度  $FOV_u$  的比例  $\frac{\Delta\psi}{FOV_u}$  等于归一化图像平面内相机中心的偏移量，因此由偏航角变化所引起的目标框在视野中的水平位置变化可以用过计算得出，俯仰角的计算也是如此。由此可以得到公式 (4-3)。

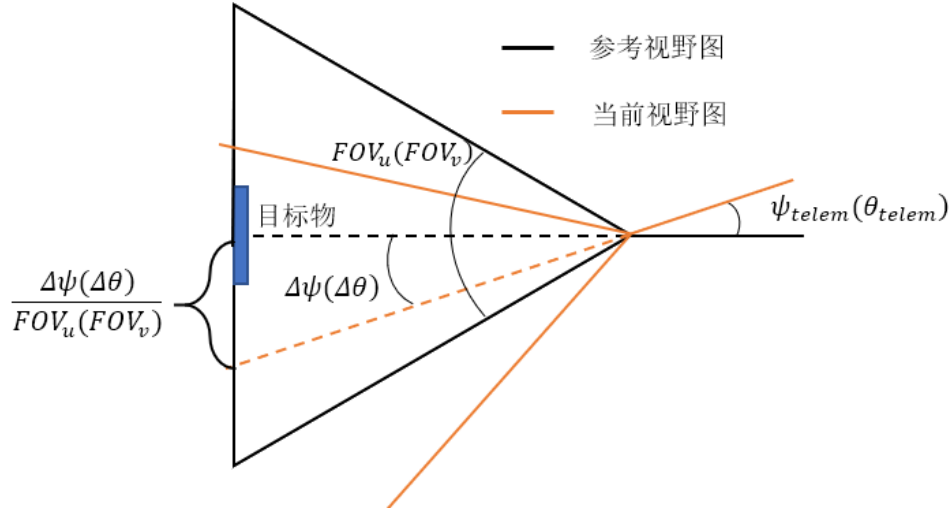


图 4-3 归一化图像平面

$$\begin{aligned}
 \Delta f_{u\psi} &= \Delta f_u \\
 \Delta f_{uy} &= \Delta f_u - \frac{\psi_{telemref} - \psi_{telem}}{FOV_u} \\
 \Delta f_{vz} &= \Delta f_v - \frac{\theta_{centroidref} - \theta_{telem}}{FOV_v} \\
 \Delta f_{\Delta x} &= \Delta f_{\Delta}
 \end{aligned} \tag{4-3}$$

其中  $\Delta f_{u\psi}$  ——表示由偏航角引起的图像水平方向的偏移量；

$\Delta f_{uy}$  ——表示无人机水平移动引起的图像水平方向的偏移量；

$\Delta f_{vz}$  ——表示由无人机高度引起图像竖直方向的偏移量；

$\Delta f_{\Delta x}$  ——表示无人机与目标距离引起的目标框在视野中大小的变化；

$FOV_u$  ——表示相机水平视场角；

$FOV_v$  ——表示相机竖直视场角；

由 (4-3) 公式可以看到，无人机的偏航角变化由  $\Delta f_{u\psi}$  决定，无人机沿机体  $y$  轴的运动由  $\Delta f_{uy}$  决定，无人机沿机体  $z$  运动由  $\Delta f_{vz}$  决定，无人机沿机体  $x$  轴运动由  $\Delta f_{\Delta x}$  决定。此时，无人机-悬挂物系统自身控制量  $(x, y, z, yaw)$  是分别由四个独立的误差量决定的，整个解耦成功。

由于式 (4-3) 需要视场角大小，视场角的求取如图 4-4 所示：

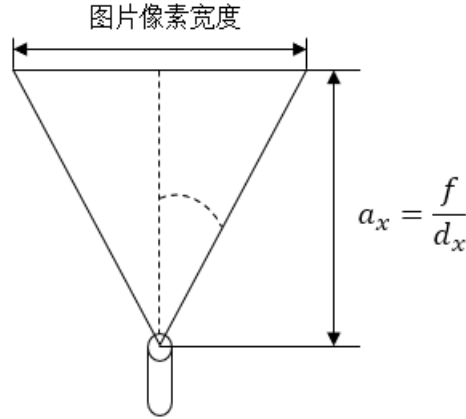


图 4-4 相机视场角示意图

图中的  $f$  表示相机的焦距， $d_x$  为相机内参，表示相机坐标系  $x$  方向单个像素的物理大小。 $a_x$  表示相机坐标系  $x$  方向焦距的像素大小。根据勾股定理求得无人机水平方向与竖直方向的视场角，如式（4-4）。

$$FOV_u = 2 \arctan \frac{\frac{1}{2} w_{im}}{a_x} \quad (4-4)$$

$$FOV_v = 2 \arctan \frac{\frac{1}{2} h_{im}}{a_y}$$

根据相机模型可以将解耦后的图像平面误差量  $(\Delta f_{u\psi}, \Delta f_{uy}, \Delta f_{vz}, \Delta f_{\Delta x})$  转换到相机物理坐标系下，并根据无人机-相机间的姿态关系，将其转换到无人机坐标系下无人机的位置误差量  $(x_{im}, y_{im}, z_{im})$ ，以及无人机偏航角的误差量  $\Delta \psi_{im}$ 。计算公式如下：

$$\Delta x_{im} = \Delta f_{\Delta x} \sqrt{A_{exp}} \sqrt{\frac{f_x f_y}{w_{im} h_{im}}} \quad (4-5)$$

$$\Delta y_{im} = \Delta f_{uy} d_{exp} \frac{w_{im}}{f_x} \quad (4-6)$$

$$\Delta z_{im} = \Delta f_{vz} d_{exp} \frac{h_{im}}{f_y} \quad (4-7)$$

$$\Delta \psi_{im} = \Delta f_{u\psi} FOV_u \quad (4-8)$$

这里的  $d_{exp}$  和  $A_{exp}$  为控制器设计参数，分别为预设理想的跟踪距离以及在此理想距离下的跟踪框面积大小。根据得到的四个误差量设计 PD 控制律：

$$v_{x_e} = k_{P_x} \Delta x_{im_k} + k_{D_x} (\Delta x_{im_k} - \Delta x_{im_{k-1}}) + v_x \quad (4-9)$$

$$v_{y_e} = k_{p_y} \Delta y_{m_k} + k_{D_y} (\Delta y_{m_k} - \Delta y_{m_{k-1}}) + v_y \quad (4-10)$$

$$v_{z_e} = k_{p_z} \Delta z_{m_k} + k_{D_z} (\Delta z_{m_k} - \Delta z_{m_{k-1}}) + v_z \quad (4-11)$$

其中  $v_{x_e}$ 、 $v_{y_e}$ 、 $v_{z_e}$  ——表示无人机期望速度；

$k_{p_x}$ 、 $k_{p_y}$ 、 $k_{p_z}$  ——表示比例项参数；

$k_{D_x}$ 、 $k_{D_y}$ 、 $k_{D_z}$  ——表示微分项参数；

由此求得无人机自身的期望速度  $v_Q^d = (v_{x_e}, v_{y_e}, v_{z_e})$ ，并通过数值积分可以求得无人机的期望位置  $\mathbf{x}_d$ 。将无人机的期望位置  $\mathbf{x}_d$  以及无人机偏航角  $\Delta\psi_m$  作为无人机-悬挂物姿态控制器的控制输入量，组成无人机-悬挂物视觉跟踪控制系统。控制器框图如图 4-5 所示。至此，基于 TLD 算法的无人机-悬挂物视觉跟踪控制系统控制律设计就完成了。

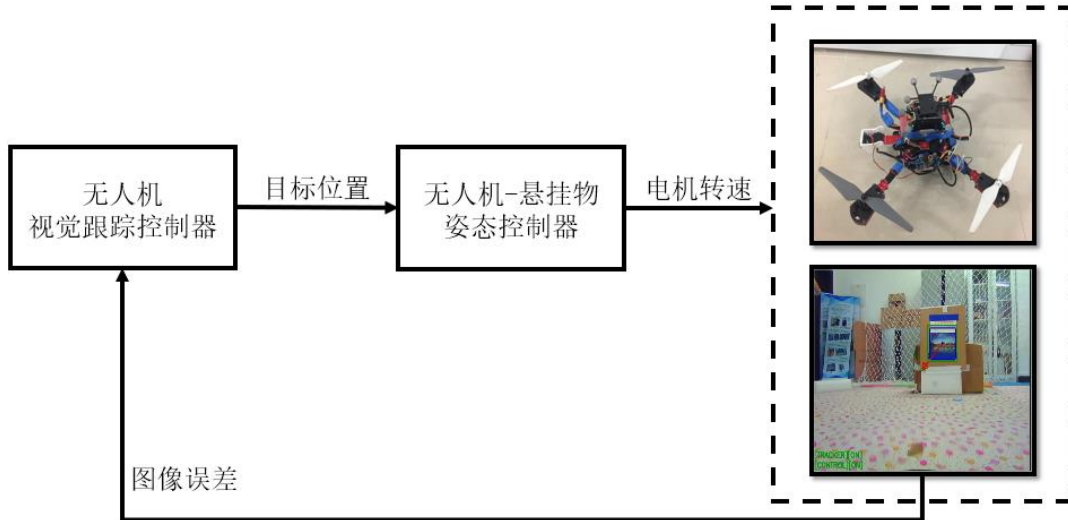


图 4-5 基于 TLD 的无人机-悬挂物视觉跟踪控制器

视觉追踪控制器作为控制器前端将传入的图像跟踪偏差通过 PD 控制器计算出无人机目标位置，并将目标位置传给无人机-悬挂物姿态控制器进行姿态控制，最后解算出电机转速传给无人机电调执行层进行飞行控制。

### 4.3 本章小结

本章介绍了 TLD 视觉追踪算法并且分析了 TLD 算法的优劣。设计了基于 TLD 的无人机-悬挂物系统视觉跟踪控制器，针对系统存在耦合的情况，对控制器进行解耦。使得无人机-悬挂物系统可以长时间跟踪跟踪目标。



## 第 5 章 实验平台搭建及实验结果分析

为了验证所设计的控制器的可行性以及其性能，本章搭建了无人机-悬挂物实验平台，设计实验方法，并借助运动捕捉系统完成了对无人机-悬挂物飞行控制器的实验验证以及追踪控制器的算法验证。本文的所有算法都是在 ROS 机器人操作系统中运行的，这可以保证不同上位机之间的通讯以及算法信号的实时传输。接下来本章将对实验过程进行详细分析。

### 5.1 实验平台的搭建

#### 5.1.1 ROS 操作系统

ROS 操作系统是由 2007 年斯坦福大学开发的，ROS 系统的开发目的就是提高机器人开发过程中代码复用率，ROS 系统封装了大量开源库，调试工具以及设备驱动，方便开发人员做二次开发，提高开发过程的效率。同时，ROS 采用分布式的处理框架，通过主题发布消息来实现多个可执行文件之间的通信，方便多个开发人员一起开发项目。

本文采用 ROS 框架开发程序，地面站与无人机上工控机共享一个 ROS master，机载工控机将图像信息通过消息的方式发布给 ROS 中节点，地面站相应节点接收图像消息并且选定跟踪目标同时以消息信息形式发布给图像跟踪节点。通过 ROS 下的 Rviz 将图像消息以及无人机和悬挂物的实时轨迹显示出来，以便进行调试和结果显示。

#### 5.1.2 硬件平台的搭建

本文使用四轴 F450 型号的小型四旋翼无人机，搭载 pixhawk 二代飞行控制器。pixhawk 是目前非商业化的开源飞控中较为完善的，可以很好的完成商业飞控的大多数功能，并且也很方便无人机研究人员进行二次开发。本文使用的机载工控机为 Intel Nuc i5 的控制器，工控机和无人机飞行控制器通过串口通信，采用开源 mavlink 通讯协议，对无人机进行控制指令的发布。无人机的正前方搭载了一个 1080 分辨率的高清摄像头，用来完成对目标的跟踪。无人机的正下方也搭载了一个同样型号的单目摄像机，并且为了扩大视野，为其安装了鱼镜头，用来对悬挂物的位置进行实时的跟踪。在无人机中心安置运动捕捉系统识别刚体标签，通过外部传感器运动捕捉系统获得无人机实时位姿反馈。整个

系统的组成如图 5-1 所示：

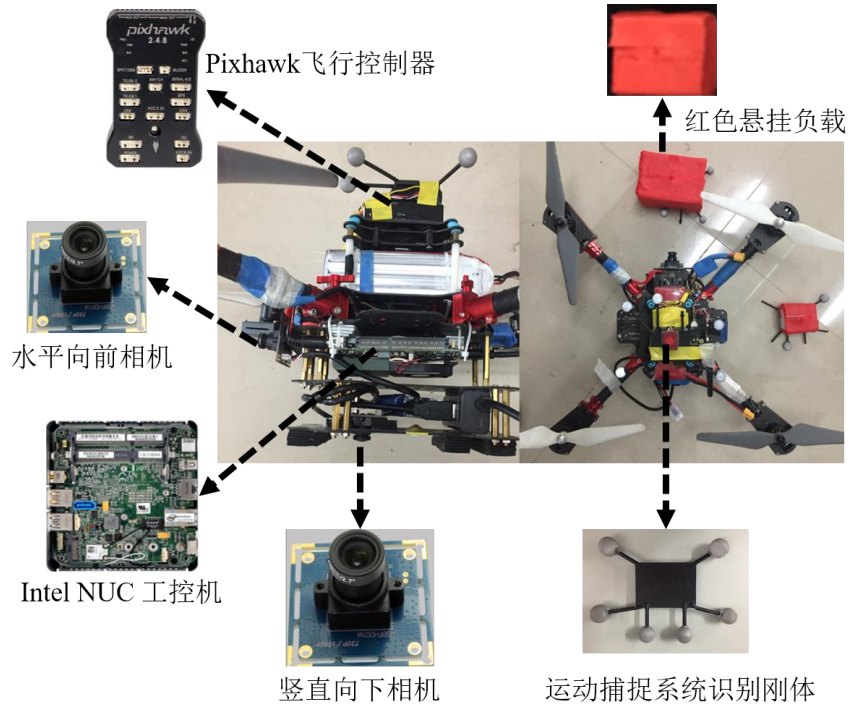


图 5-1 系统主要组成

## 5.2 实验结果及分析

### 5.2.1 鱼眼相机的标定

本文使用的  $1980 \times 1080$  分辨率的高清摄像头装载一个鱼镜头，由于我们需要对相机的内参进行标定，而鱼镜头是由畸变的不能直接进行内参标定，如图 5-2，因此在标定之前必须对鱼眼相机进行畸变校正。



图 5-2 带有畸变的鱼眼相机

本文采用 ETH 实验室 Scaramuzza 教授开发的基于 Matlab 的鱼眼相机标定插件<sup>[58]</sup>，将图像压缩至指定大小进行角点提取：

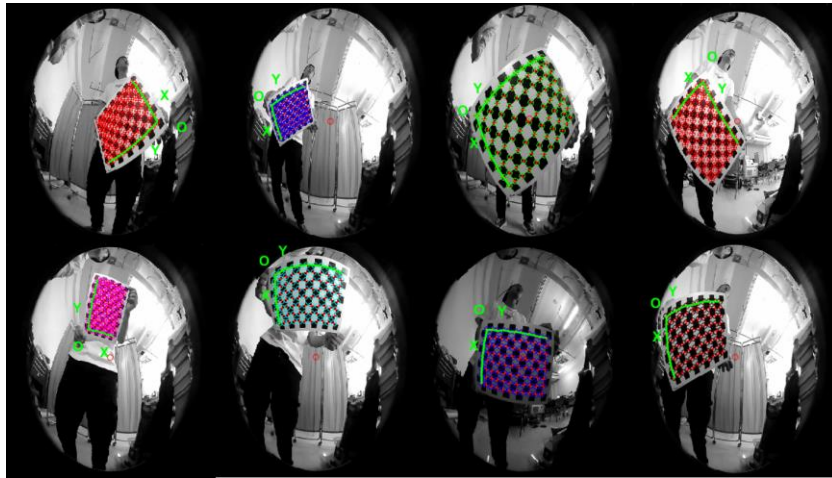


图 5-3 角点提取

然后进行相机标定，将标定后的结果将图片进行重投影并得到相机模型参数如图所示：

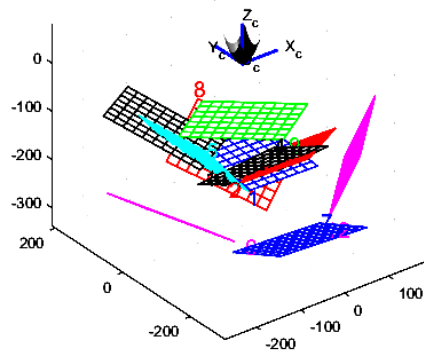


图 5-4 鱼眼相机模型

重投影误差如图 5-5 所示：

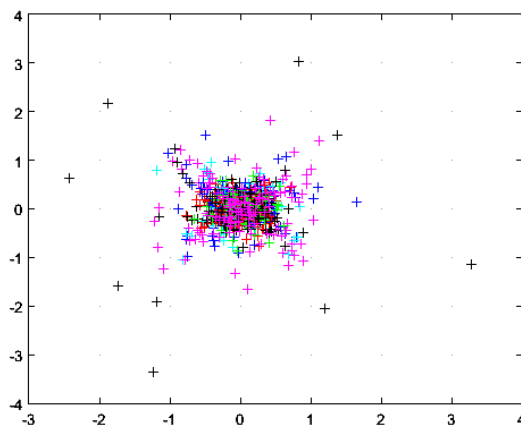


图 5-5 重投影误差

经过校正后的图像如图 5-6 所示：

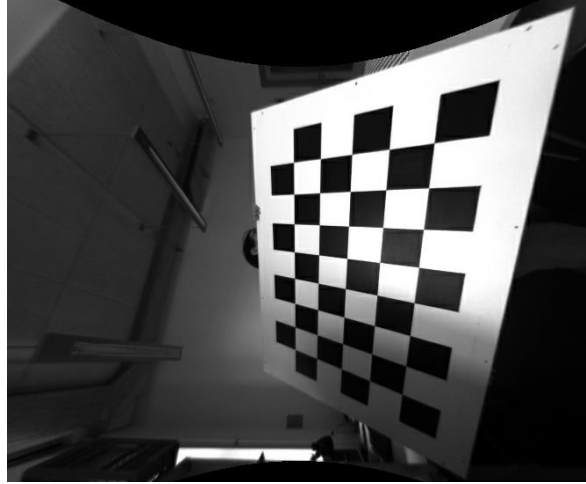


图 5-6 校正后的图像

### 5.2.2 相机-悬挂物模型实验

为了验证相机-悬挂物模型是否能够根据 CamShift 算法得到的二维图像坐标去正确的估计悬绳的单位方向向量以及悬绳方向向量的导数，并通过悬绳的长度去估计悬挂物的具体位置以及悬挂物速度。我们在悬挂物上贴上 Optitrack 反光小球通过 Optitrack 运动捕捉系统去得到一个真实的量作为对比实验使用。如图 5-7 所示：

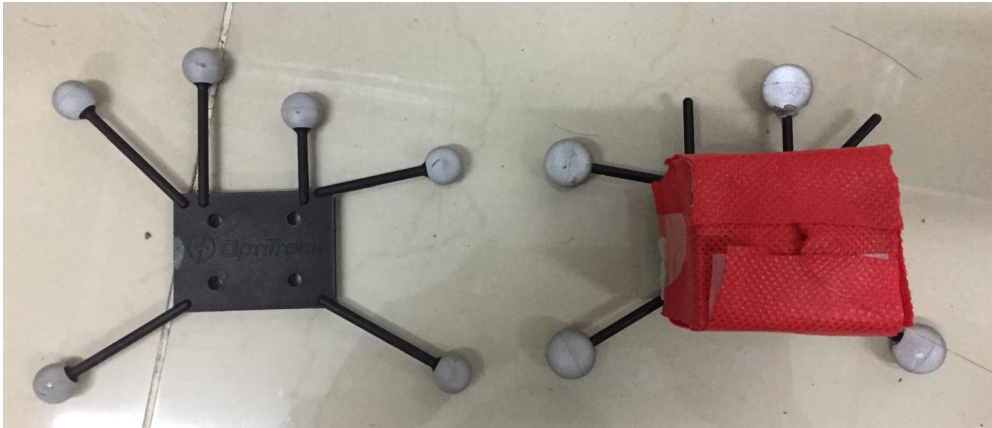


图 5-7 悬挂物示意图

图 5-7 中左侧为运动捕捉系统配套的由反光小球组成的刚体，将其放入运动捕捉系统中，通过运动捕捉系统的红外摄像头可以实时捕捉到该刚体在运动捕捉系统实验场景下的世界坐标。我们将其贴在悬挂物的下方，如图 5-7 右侧所示，用来当做实时对比量。我们将悬挂物包装为红色用以 CamShift 算法跟踪，

如图 5-8 所示，图中红色框为跟踪算法实时估计的悬挂物在图像中的位置。

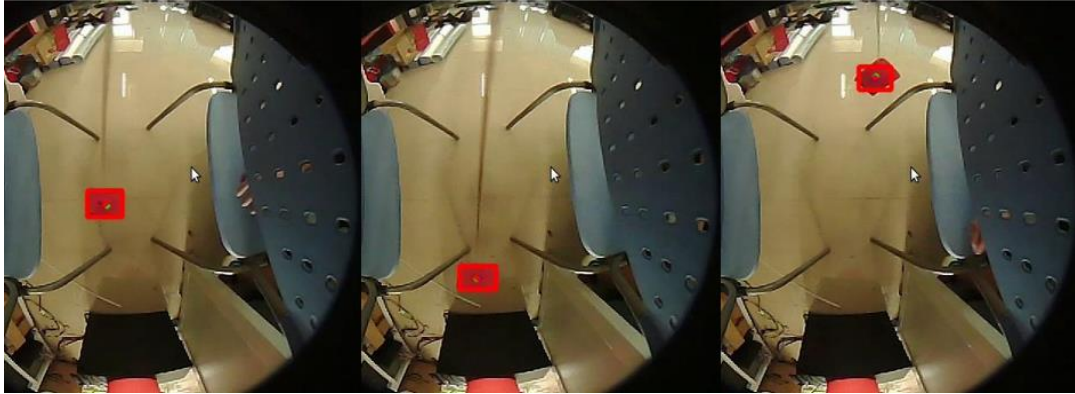


图 5-8 CamShift 跟踪效果

我们将运动时通过相机-悬挂物模型推算出的悬绳向量和悬挂物位置在 Rviz 软件中显示出来如图 5-9 所示：

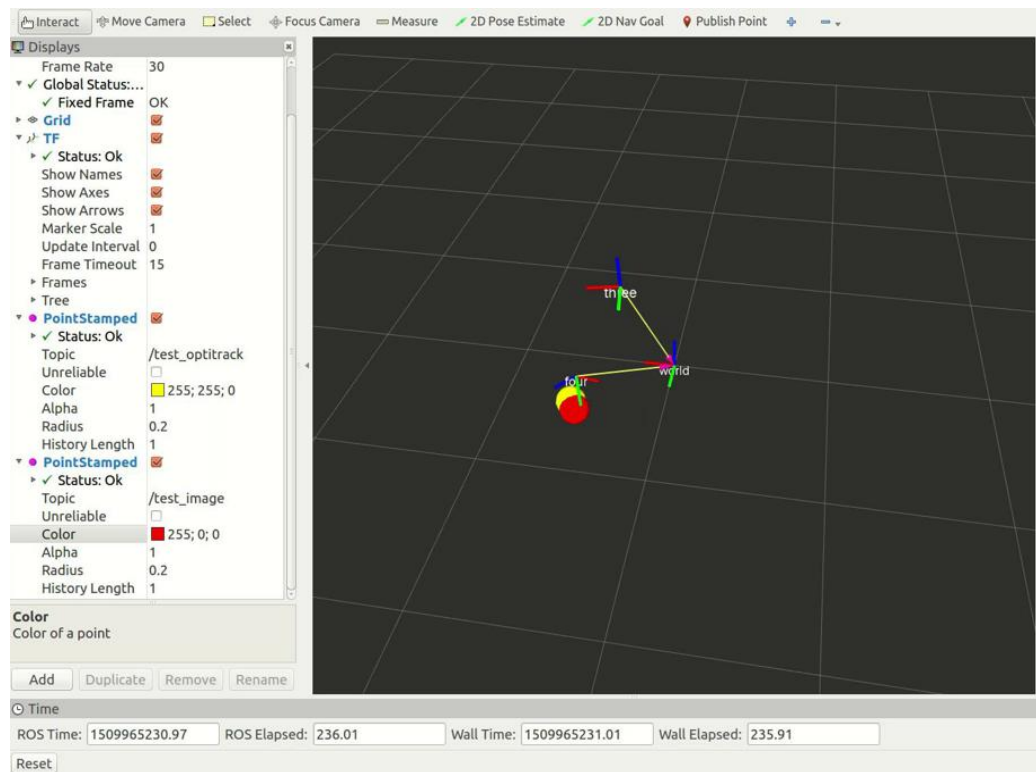


图 5-9 Rviz 视图

图中黄色的球为通过 Optitrack 运动捕捉系统得到的真实位置，红色为通过相机-悬挂物模型推算出的悬挂物位置，在运动过程中，两个小球基本上是重合的，悬绳向量与模型推导出向量的曲线如图 5-10 所示：



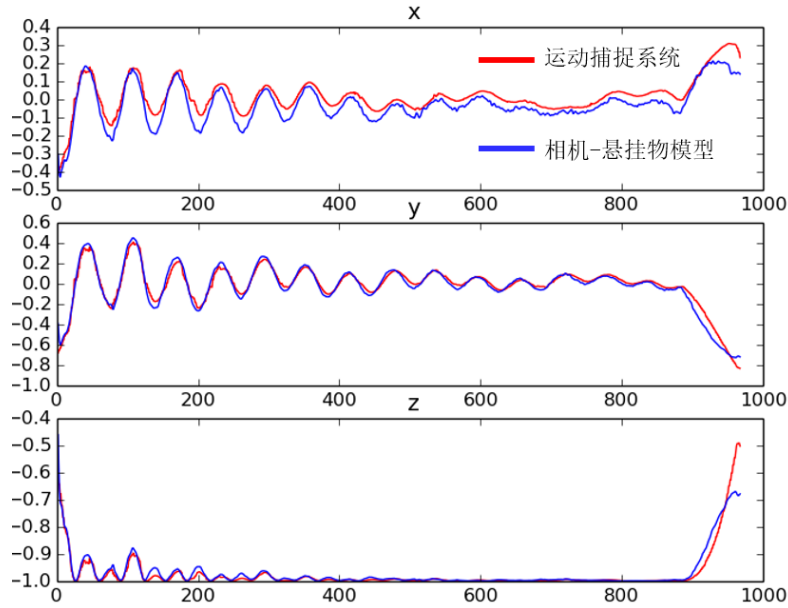


图 5-10 悬绳向量

图中曲线分别代表悬绳向量 $\mathbf{q}$ 的三个方向的分量，其中红色曲线代表通过运动捕捉系统得到的真是量，蓝色曲线是用过相机-悬挂物模型计算得到的悬绳向量。可以看到通过相机-悬挂模型与真是量基本重合，在静止时，两个向量有一定的偏移，这是因为相机-悬挂物模型近似假设悬绳系点是与光心重合导致的，但是这并不影响我们对飞机的控制。如图 5-11 所示，为悬挂物的世界坐标位置变化曲线，同样使用运动捕捉系统作为真实值对照：

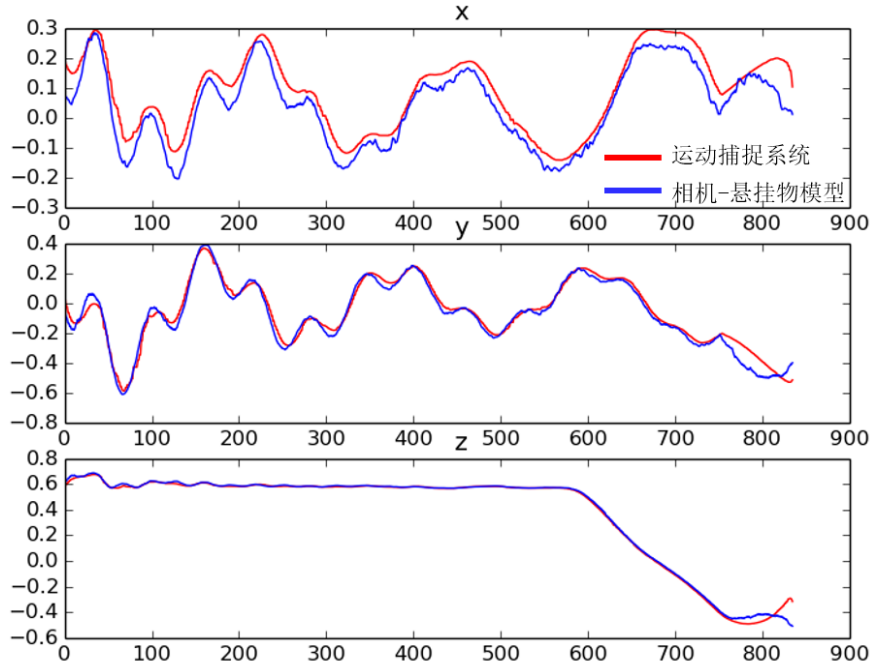


图 5-11 悬挂物实时位置

其中，红色曲线为通过相机-悬挂模型推算出的悬挂物位置，蓝色曲线为运动捕捉得到的真实量。

### 5.2.3 无人机-悬挂物飞行控制器实验结果及分析

本文验证了无人机-悬挂物飞行控制器的正确性，先定义一些控制器用到的参数，如表 5-1 所示：

表 5-1 无人机-悬挂物飞行控制器实验参数值

参数名称	参数值
无人机质量 $m_Q$	2 kg
重力系数 $g$	9.8 N/kg
鱼眼相机内参 $f_x^d$	146.316999
鱼眼相机内参 $f_y^d$	142.935727
图像大小 $A$	640×480 pixel <sup>2</sup>
悬挂物质量 $m_L$	0.35 kg
悬绳长度 $l$	1.2 m
姿态控制器位置环P	(2.5,2.5,1)
姿态控制器位置环D	(1.75,1.75,1)
悬绳向量控制环 P	(1.2,1.2,0.8)
悬绳向量控制环D	(1.5,1.5,0.5)
悬挂物位置环P	(0.5,0.5,0.2)
悬挂物位置环D	(0.5,0.5,0.1)

本文采用了不考虑悬挂物摆动的普通无人机控制器与本文设计的无人机-悬挂物控制器进行了对比实验。在实验中，我们令无人机起飞至一个固定高度同时观察悬挂物的稳定时间。为了使得无人机-悬挂物飞行控制器实验对比效果明显，实验中采用了 1.2m 的绳长，这使得悬挂物摆动时对无人机的影响更大，更易于观察无人机-悬挂物控制器的控制效果。通过实验我们将悬挂物起飞时在 x-y 平面的偏移量记录了下来如图 5-12 所示，其中蓝色曲线表示使用无人机-悬挂物控制器时悬挂物在 x-y 平面偏移量的变化，红色为单独使用无人机控制器时悬挂物在 x-y 平面的偏移量。

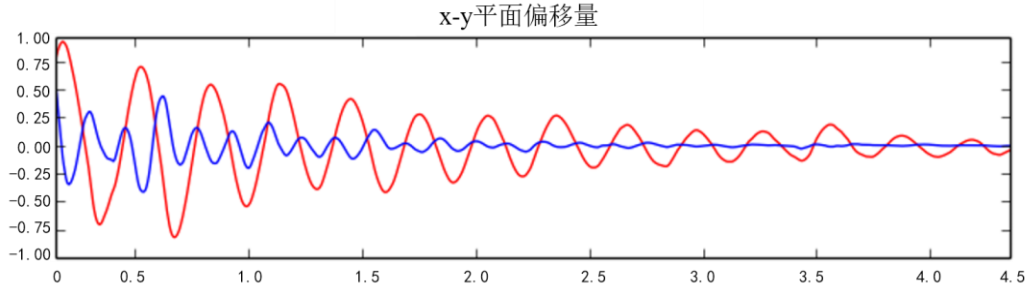


图 5-12 悬挂物在 x-y 平面偏移量

#### 5.2.4 无人机-悬挂物系统视觉跟踪实验结果及分析

我们在无人机前端搭载高清分辨率摄像头，相机 z 轴方向与无人机机头方向基本重合。通过对圈定目标框的识别，对目标进行实时的跟踪。为了便于实验的进行，实验中缩短了绳子的长度与悬挂物的质量，因此控制器的参数需要重新设定。实验中参数如表 5-2 所示。

表 5-2 无人机-悬挂物跟踪系统参数值

参数名称	参数值
悬挂物质量 $m_L$	0.2 kg
悬绳长度 $l$	0.76 m
姿态控制器位置环P	(2.5,2.5,1)
姿态控制器位置环D	(1.75,1.75,1)
悬绳向量控制环 P	(1.8,1.8,1.2)
悬绳向量控制环D	(1.2,1.2,0.3)
悬挂物位置环P	(0.5,0.5,0.2)
悬挂物位置环D	(0.5,0.5,0.1)
无人机视觉跟踪控制器 P 参数	(1.5,1.5,1)
无人机视觉跟踪控制器 D 参数	(1.2,1.2,1)

由于 TLD 是实时的学习算法，因此跟踪的目标可以是任意的，在本文中选择了一块带有图案的纸板，在纸板上的圈定图案并作为算法的跟踪目标，如图 5-13 所示。





图 5-13 视觉追踪图像

图中红色箭头代表图像平面内像素  $u$ ,  $v$  的误差量。绿色框代表当前目标框在图像中面积大小，蓝色框为设定大小，因此可以看到两个框中间的橘黄色箭头代表图像面积的误差量。误差量作为跟踪控制器的输入量对无人机的飞行进行控制。

在无人机控制悬挂物稳定的过程中对目标进行实时跟踪，整个过程如图 5-14 所示，从悬绳向量以及悬挂物位置曲线可以看到无人机在起飞过程中悬挂物摆动较大，但是通过控制器可以快速的调整无人机姿态来保证悬挂物快速稳定，并且保持在运输过程中悬挂物基本可以基本保持稳定。整个过程中，悬挂物的反馈量都是由鱼眼相机提供，并且可以保证算法的实时运行。

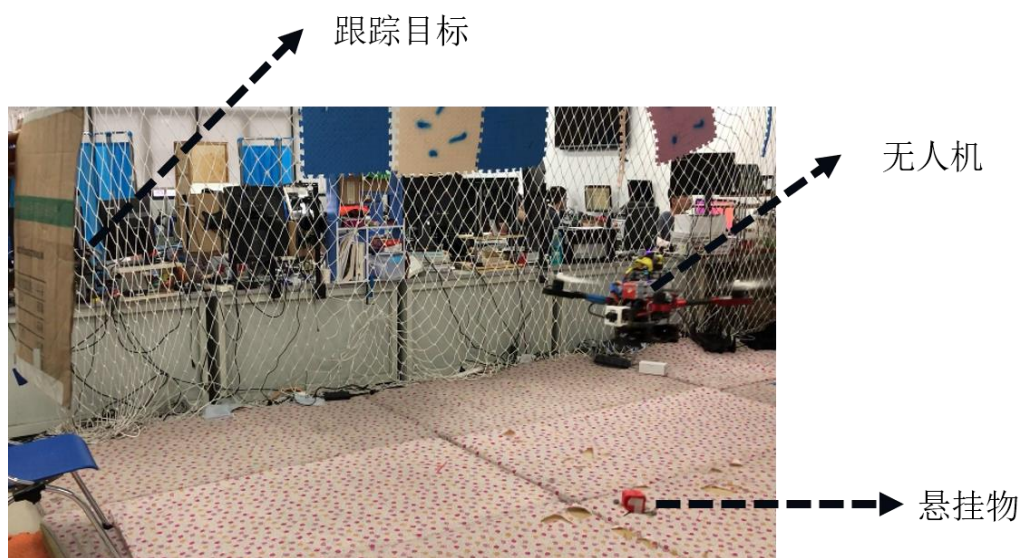


图 5-14 无人机-悬挂物追踪过程

通过实验的得到无人机在跟踪飞行过程中图像平面水平像素误差  $e_u$ 、竖直像素误差  $e_v$  以及目标框大小比例误差  $e_A$  如图 5-15 所示。

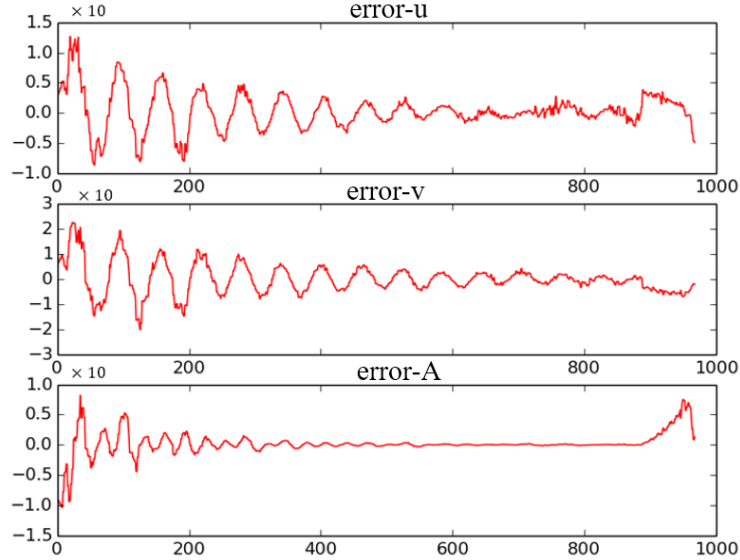


图 5-15 视觉追踪数据图

可以看到，一开始误差较大是由于在起飞过程中，目标在相机视野偏移量较大，但是通过控制器实时跟踪，可以始终保持误差维持在一个很小的值。也就是说在无人机-悬挂物系统视觉跟踪飞行过程中，通过无人机-悬挂物视觉跟踪控制器可以使得跟踪目标始终保持在图像中心，并且跟踪距离始终保持一定。

### 5.3 本章小结

本章搭建了无人机-悬挂物系统视觉跟踪实验平台，并且对整个系统的各个模块分别进行的控制器的性能验证，最后对综合控制器在运输过程中的飞行性能进行了实验验证。实验结果也表明了通过控制器对无人机姿态的实时控制使得在整个运输过程中悬挂物可以基本保持稳定，并且也验证了相机-悬挂物模型的正确性和可行性，同时也验证了视觉追踪控制器的实时性和准确性。

## 结 论

随着小型四旋翼无人机的快速发展，无人机在运输方面的研究已经吸引了越来越多的研究者。本文主要针对无人机使用悬绳运输负载问题进行研究，通过使用悬绳吊挂悬挂物的方法，使无人机可以通过悬挂负载的方式执行运输任务，同时使用机载摄像头获取悬挂物的位置反馈。针对飞行运输问题，设计了视觉跟踪系统和无人机运输任务的完整过程，本文完成的任务主要有以下几点：

(1) 针对无人机-悬挂物模型进行了动力学建模，推导出无人机-悬挂物的动力学模型。

(2) 根据无人机-悬挂物动力学模型设计无人机-悬挂物姿态控制器，包括设计了无人机-悬挂物位置控制环，速度控制环以及姿态控制环。通过实验证明无人机-悬挂物姿态控制器可以快速减小悬挂物的摆动，实现无人机-悬挂物系统的稳定飞行。

(3) 使用 TLD 跟踪算法设计无人机视觉跟踪控制器，并通过实验证明了该控制器在长期跟踪时的实时性和稳定性。

(4) 对相机-悬挂物几何模型进行了建模，该模型型可以将图像平面二维信息换算成悬挂物三维坐标信息。通过实验验证了模型的准确性，使用融合 Kalman 滤波的 CamShift 算法对悬挂物的位置进行追踪，通过实验验证了利用模型计算出的悬挂物实时位置与悬挂物真实位置几乎重合。

(5) 融合无人机视觉跟踪控制器以及无人机-悬挂物姿态控制器实现了无人机-悬挂物运输任务的综合控制器，将视觉跟踪控制器作为前端算法，将其计算得到的目标位置传给无人机-悬挂物姿态控制器对无人机-悬挂物飞行姿态进行控制。

本文完成了无人机-悬挂物运输过程的实验，将无人机视觉跟踪和无人机-悬挂物姿态控制结合在一起，通过视觉对悬挂物进行了控制，快速稳定负载的摆动。但是接下来还有一些工作需要去完善和实现，主要有以下几个方面：

(1) 本文的实验主要是在室内进行，虽然悬挂物的控制已经可以通过视觉实现，但是无人机自身的位置姿态还需要室内的运动捕捉系统提供，因此未来可以将用于无人机自身定位的惯性视觉里程计融入到整个系统当中，使得整个系统可以完全脱离运动捕捉系统并且在室内室外都可以很好的完成任务。

(2) 本文在跟踪悬挂物实时位置时使用的是融合 Kalman 滤波的改进的 CamShift 算法，该算法虽然实时性和鲁棒性都还不错，但是由于该算法是基于颜色的，对场景有一定的要求，因此未来的工作可以尝试使用其他的非基于颜

色的更加鲁棒的跟踪算法对悬挂物进行视觉定位，当然，也要考虑到算法的实时性。

（3）本文的相机-悬挂物模型由于是近似推导的，因此在实验部分可以看到通过模型估计得到的向量和真实向量还是有微小偏差，虽然不影响对悬挂物的控制，但是未来的工作也可以通过精确的建立相机-悬挂物的模型来完善对悬挂物的控制。

## 参考文献

- [1] 景岩. 无人机发展综述[J]. 才智, 2013(16):189.
- [2] Nonami K. Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2007, 1(2):120-128.
- [3] 王振华, 黄宵宁, 梁焜,等. 基于四旋翼无人机的输电线路巡检系统研究[J]. 中国电力, 2012, 45(10):59-62.
- [4] 王俊生. 四旋翼碟形飞行器控制系统设计及控制方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2007.
- [5] Ruggiero F, Trujillo M A, Cano R, et al. A Multilayer Control for Multirotor UAVs Equipped with a Servo Robot Arm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2015:4014-4020.
- [6] Kim S, Choi S, Kim H J. Aerial Manipulation Using a Quadrotor with a Two DOF Robotic Arm[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 4990-4995.
- [7] Mo R, Geng Q, Lu X. Study on Control Method of a Rotor UAV Transportation with Slung-Load[C]//Control Conference. IEEE, 2016:3274-3279.
- [8] Garimella G, Kobilarov M. Towards Model-Predictive Control for Aerial Pick-and-Place[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2015:4692-4697.
- [9] 侯志强, 韩崇昭. 视觉跟踪技术综述[J]. 自动化学报, 2006, 32(4):603-617.
- [10] 范保杰, 朱琳琳, 崔书平,等. 旋翼无人机视觉跟踪系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1):149-152.
- [11] 李伟荣. 带悬挂吊舱的八旋翼特种无人机动力学建模与控制[D]. 浙江大学, 2015.
- [12] Dai S, Lee T, Bernstein D S. Adaptive Control of a Quadrotor UAV Transporting a Cable-Suspended Load with Unknown Mass[C]//Decision and Control. IEEE, 2014:6149-6154.
- [13] Yang S, Xian B. Trajectory tracking control design for the system of a quadrotor UAV with a suspended payload[C]//Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese. IEEE, 2017: 777-782.
- [14] 贾二平. 基于视觉伺服的无人机悬挂负载控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.

- [15]李婷. 基于强化学习的无人机悬挂负载系统控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016
- [16]Yanai N, Yamamoto M, Mohri A. Feedback Control for Wire-Suspended Mechanism with Exact Linearization[C]//Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2002:2213-2218 vol.3.
- [17]Yu J, Lewis F L, Huang T. Nonlinear Feedback Control of a Gantry Crane[C]//American Control Conference, 1995. Proceedings of the. IEEE Xplore, 1995:4310-4315 vol.6.
- [18]Schultz J, Murphey T. Trajectory Generation for Underactuated Control of a Suspended Mass[J]. 2012, 44(8):123-129.
- [19]Starr G, Wood J, Lumia R. Rapid Transport of Suspended Payloads[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2006:1394-1399.
- [20]Zameroski D, Starr G, Wood J, et al. Rapid Swing-Free Transport of Nonlinear Payloads Using Dynamic Programming[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2008, 130(4):472-480.
- [21]Omar H M. New Fuzzy-based Anti-Swing Controller for Helicopter Slung-Load System Near Hover[C]//IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. IEEE, 2009:474-479.
- [22]Palunko I, Fierro R. Adaptive Control of a Quadrotor with Dynamic Changes in the Center of Gravity[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1):2626-2631.
- [23]Palunko I, Fierro R, Cruz P. Trajectory Generation for Swing-Free Maneuvers of a Quadrotor with Suspended Payload: A Dynamic Programming Approach[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012:2691-2697.
- [24]Sreenath K, Lee T, Kumar V. Geometric Control and Differential Flatness of a Quadrotor UAV with a Cable-Suspended Load[C]//Decision and Control. IEEE, 2013:2269-2274.
- [25]Sreenath K, Michael N, Kumar V. Trajectory Generation and Control of a Quadrotor with a Cable-Suspended Load - A Differentially-Flat Hybrid System[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013:4888-4895.
- [26]Allothman Y, Jasim W, Gu D. Quad-rotor Lifting-Transporting Cable-Suspended Payloads Control[C]//International Conference on Automation and Computing. IEEE, 2015:1-6.
- [27]Crousaz C, Farshidian F, Buchli J. Aggressive Optimal Control for Agile Flight with a Slung Load[C]//IEEE/rsj International Conference on

- Intelligent Robots and Systems, 2014
- [28]Todorov E, Li W. A Generalized Iterative LQG Method for Locally-Optimal Feedback Control of Constrained Nonlinear Stochastic Systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. 2005: 300-306
- [29]Faust A, Palunko I, Cruz P, et al. Learning Swing-Free Trajectories for UAVs with a Suspended Load[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013:4902-4909.
- [30]Lee T. Geometric Control of Quadrotor UAVs Transporting a Cable-Suspended Rigid Body[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017.
- [31]Foehn P, Falanga D, Kuppuswamy N, et al. Fast Trajectory Optimization for Agile Quadrotor Maneuvers with a Cable-Suspended Payload[C]//Robotics: Science and Systems. 2017: 1-10.
- [32]Wu Y, Lim J, Yang M H. Online Object Tracking: A Benchmark[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2013:2411-2418.
- [33]Wu Y, Lim J, Yang M H. Object Tracking Benchmark[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(9):1834.
- [34]Weng S K, Kuo C M, Tu S K. Video Object Tracking Using Adaptive Kalman Filter[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2006, 17(6):1190-1208.
- [35]Crisan D, Doucet A. A Survey of Convergence Results on Particle Filtering Methods for Practitioners[J]. Signal Processing IEEE Transactions on, 2002, 50(3):736-746.
- [36]Collins R T. Mean-shift Blob Tracking Through Scale Space[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2003:234.
- [37]Hare S, Saffari A, Torr P H S. Struck: Structured Output Tracking with Kernels[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2012:263-270.
- [38]Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-Learning-Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7):1409.
- [39]Nam H, Han B. Learning Multi-domain Convolutional Neural Networks for Visual Tracking[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2016:4293-4302.
- [40]Kristan M, Pflugfelder R, Matas J, et al. The Visual Object Tracking VOT2013 Challenge Results[C]//IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. IEEE, 2014:98-111..
- [41]Bertinetto L, Valmadre J, Henriques J F, et al. Fully-Convolutional Siamese

- Networks for Object Tracking[C]//European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016:850-865.
- [42]袁峻. 无人机图像目标跟踪与定位[D]. 南京理工大学, 2017.
- [43]范才智, 刘云辉, 吴亮, 等. 无人直升机基于视觉的静止点目标跟踪[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2).
- [44]姜运宇. 旋翼无人机跟踪地面移动目标的视觉控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [45]赵晓光. 基于视觉的小型无人直升机跟踪地面目标方法研究[C]//中国科学院博士后学术年会暨高新技术前沿与发展学术会议程序册. 2010.
- [46]王勋. 无人机自主跟踪地面运动目标方法与试验研究[D]. 国防科学技术大学, 2012.
- [47]张天翼. 基于连续自适应均值漂移和立体视觉的无人机目标跟踪方法[D]. 南京航空航天大学, 2015.
- [48]Helble H, Cameron S. OATS: Oxford Aerial Tracking System[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2007, 55(9): 661-666.
- [49]Exner D, Bruns E, Kurz D, et al. Fast and Robust CAMShift Tracking[J]. 2010:9-16.
- [50]Mejias L, Campoy P, Saripalli S, et al. Visual Servoing for Tracking Features in Urban Areas Using an Autonomous Helicopter Abstract — The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 12(3): 2503-2508.
- [51]Saripalli S, Montgomery J F, Sukhatme G. Visually-Guided Landing of an Unmanned Aerial Vehicle[J]. IEEE Trans on Robotics & Automation, 2010, 19(3): 371-380.
- [52]Kelly J, Saripalli S, Sukhatme G S. Combined Visual and Inertial Navigation for an Unmanned Aerial Vehicle[C]//Field and Service Robotics. 2008: 255-264.
- [53]Thomas J, Loianno G, Sreenath K, et al. Toward Image Based Visual Servoing for Aerial Grasping and Perching[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2014: 2113-2118.
- [54]Castillo P, Lozano R, Dzul A. Stabilization of a Mini Rotorcraft with Four Rotors[J]. Control Systems IEEE, 2005, 25(6):45-55.
- [55]Tayebi A, Mcgilvray S. Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(3): 562-571.
- [56]Jain R P K. Transportation of Cable Suspended Load using Unmanned Aerial Vehicles: A Real-time Model Predictive Control approach[J]. 2015.
- [57]Bullo F, Lewis A D. Geometric Control of Mechanical Systems[M]. Springer,



2005

- [58]Scaramuzza B D. Ocamcalib toolbox: Omnidirectional camera calibration toolbox for matlab,” 2006, Google for ”ocamcalib[J].

## 学位论文原创性声明

作者签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

## 学位论文使用权限

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

导师签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

## 致 谢

时光如箭，岁月如梭，两年半的研究生生活如白驹过隙一般，转眼间我要毕业了。在这不短不长的两年半时间里，我很幸运遇到了学业上的老师，生活中的朋友，帮助我成长，陪伴我学习。我要感谢研究生期间遇到的每个重要的人。

首先，感谢我的导师陈浩耀副教授，两年多以来，老师尽心尽力无微不至的关心帮助与对于学术的严格督促，把我从一个什么都不懂的科研门外汉培养成为了一个有着扎实基本功的科研人员。两年多来，我从老师的身上学到了许许多多的优秀品质，老师身体力行的用自己的一言一行影响着实验室的每一个同学。每当我晚上很晚离开实验室的时候，都经常可以看到老师办公室的灯还亮着，这种奋斗的精神一直鼓舞着我们，并且也会伴随我们以后的岁月，在人生的路上继续坚持 NRSL 努力奋斗的精神，追寻有意义的人生。

然后，我要感谢实验室 15 级同窗黄晓鹏，方林旭，全凤宇，王雪锋。三人行必有我师焉。两年半的朝夕相处，他们是我学习上的榜样，也是精神上的导师，我要感谢晓鹏帮我 debug、林旭教我写代码、凤宇教我推公式、老王陪我打篮球。同时我还要感谢 NRSL 的师兄们，感谢都业贵师兄、贾二平师姐不厌其烦的在课题上为我解惑。也感谢高亚军师兄推荐我来到 NRSL 实验室。感谢秦野师兄，李婷师姐在平日里对我们研究生生活中的帮助。感谢 NRSL 师弟们将实验室的气氛活跃了起来，看到你们勤奋努力，也感染着每一个人 NRSLer 努力奋斗。感谢 305 实验室的其他小伙伴季恒勇、杨伟，和他们一起探讨学术、探讨生活，使研究生生活不再孤单。

然后，我要感谢我的家人，他们是我坚实的后盾，希望他们永远身体健康，开开心心。

最后，我要感谢哈工大，给我们提供了一流的科研环境，今后，我将遵循工大校训，努力奋斗，为母校争光！